

TREBALL FI DE CARRERA

Títol

COMPARACIÓ DELS FACTORS DE SEGURETAT D'UN TALÚS
AMB ELS MÈTODES DE L'EQUILIBRI LÍMIT I DELS ELEMENTS
FINITS.

Autor/a

Anaïs Tiffon Azuaga

Tutor/a

Pere Prat
Alberto Ledesma

Departament

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

Intensificació

Enginyeria del Terreny

Data

Maig 2015

AGRAÏMENTS

*Als meus tutors Pere Prat i Alberto Ledesma, pel temps
que han dedicat a ajudar-me a resoldre dubtes i a
guiar-me en el treball.*

*A Christian De Santos, per ensenyar-me les eines
bàsiques del programa PLAXIS.*

*Als meus pares i als meus germans, responsables de se qui sóc,
gràcies per tot el suport que m'heu donat dia a dia.*

*A Xavi, per entendre i animar-me tant, aquests 3 anys
compartits han sigut l'inici d'una gran aventura junts.*

*Als meus amics i amigues que d'alguna manera han
aportat el seu granet de sorra.*

RESUM

Avui en dia els estudis de l'anàlisi de l'estabilitat del terreny s'estan fent cada cop amb més freqüència. El principal objectiu d'aquest estudi és detectar a temps les zones del terreny que presenten un desequilibri de les seves forces i per tant són inestables. Coneixent aquestes zones, que poden arribar a ser perilloses, es pot actuar amb conseqüència i aplicar unes mesures tant preventives com correctores evitant així un desastre en el qual hi hagi vides humanes implicades.

Aquest estudi de l'estabilitat del terreny conté diverses fases. Les principals són la recollida de dades de camp, els assajos de laboratori per conèixer els valors dels paràmetres del terreny i l'aplicació dels mètodes teòrics per tal de conèixer quin factor de seguretat té el terreny i saber si ens trobem davant d'una zona estable o inestable. Aquesta última fase d'aplicació dels mètodes teòrics és on es troba la nostra tesina.

La creació de nous programes geotècnics ha facilitat molt els càlculs que requereixen un nombre molt elevat d'iteracions, com són la majoria dels mètodes de càlcul. Però cada cop són més els programes i és important conèixer les utilitats i les limitacions de cadascun d'ells així com els mètodes de càlcul que utilitzen.

En la present tesina s'ha realitzat un estudi comparatiu entre el programa GEO-SLOPE que utilitza el mètode de l'equilibri límit i el programa PLAXIS que utilitza el mètode d'elements finits. Per comparar-los, s'han escollit tres casos els quals s'han combinat amb els diferents paràmetres per estudiar com va variant el factor de seguretat. El primer cas és un estudi d'un talús sotmès a unes cotes de la làmina d'aigua diferents, el segon cas s'estudien unes argiles no drenades i per últim, la influència a l'estabilitat de les esquerdes que es formen a la part superior del talús. Un total de 180 casos ens ha servit per poder comparar tant els programes com els mètodes emprats.

ABSTRACT

Nowadays, studies of the analysis of the ground's stability are done more and more frequently. The main goal of those is to detect in time the ground zones which appear to have an imbalance of their forces, and so, becoming unstable. Studying this areas, which can become dangerous, will allow ourselves to act consequently and to apply measures so as to avoid natural disasters. Our thesis is focused in the application of theoretical methods to study them.

The study of the terrain's stability has different phases. The main ones are the collection of field data, the laboratory assays to know the values of the parameters of the fields and the application of theoretical methods so as to get the security factor of the terrain and decide if it is a stable or an instable terrain. Our thesis is focused in the phase of the application of theoretical methods.

New geotechnical programs have eased in great measure the calculus that need a high number of iterations, as most calculation methods do. As the number of calculation programs rise, it becomes important to know deeply the utilities and limitations of each one and the calculation methods they use.

In the thesis we present, a comparative study has been done between GEO-SLOPE calculus program and PLAXIS. The first one uses the limit balance method while the second one uses the finite element method. As to compare them, three cases have been chosen. Each of them has been combined with different parameters so as to study how the security factor changes. The first case studies a slope when it's affected with variable water lamina's levels. The second case studies is an undrained clay soil. The last one studies how the stability gets influenced by the cracks formed in a slope due. A total number of ninety cases in each of the programs have been done as to get conclusions about the programs themselves and the calculation methods used.

ÍNDEX DE CONTINGUTS

ÍNDEX DE FIGURES.....	vii
ÍNDEX DE TAULES	xiv
1 INTRODUCCIÓ	1
1.1 Antecedents.....	1
1.2 Objectius.....	2
1.3 Estructura del treball.....	2
2 ESTABILITAT DEL TALÚS.....	3
2.1 Aspectes generals.....	3
2.2 Paràmetres del sòl.....	5
2.3 Model Constitutiu.....	8
2.4 Efectes de l'aigua a l'estabilitat	12
2.5 Factor de seguretat	13
3 MÈTODES DE CÀLCUL	15
3.1 Equilibri límit	16
3.1.1 Mètode de Spencer	17
3.1.2 Mètode Bishop Simplificat	18
3.1.3 Mètode simplificat de Janbu	20
3.2 Elements Finites	21
4 ANÀLISIS DELS MODELS.....	23
4.1 Introducció.....	23
4.2 Descripció dels programes	23
4.2.1 GEO-SLOPE	23
4.2.2 PLAXIS 2D AE	24
4.3 CAS 1: Variació de la cota de la làmina d'aigua	25
4.3.1 GEO-SLOPE	26

4.3.2	PLAXIS 2D AE	26
4.3.3	Anàlisi dels casos	27
4.4	<i>CAS 2: Sòls argilosos secs</i>	88
4.4.1	GEO-SLOPE	89
4.4.2	PLAXIS 2D AE	89
4.4.3	Anàlisi dels casos	90
4.5	<i>CAS 3: Esquerdas a la part superior del talús</i>	114
4.5.1	GEO-SLOPE	115
4.5.2	PLAXIS 2D AE	115
4.5.3	Anàlisi dels casos	116
5	ANÀLISI DE RESULTATS	122
5.1	<i>CAS 1: Variació de la cota de la làmina d'aigua</i>	122
5.2	<i>CAS 2: Sòls argilosos secs</i>	125
5.3	<i>CAS 3: Esquerdas a la part superior del talús</i>	127
6	CONCLUSIONS	128
6.1	<i>Futures línies de treball</i>	129
7	Referències Bibliogràfiques	130
	ANNEX 1: Desplaçaments totals	132

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1 Talús en carretera (Blogdeenergia/carreteras, 2009)	4
Figura 2 a.)Gràfica esforç-deformació. b.)Gràfica dels diferents angles de fricció	7
Figura 3 Esquema pel mòdul de Young i coeficient de Poisson.....	7
Figura 4 Esquema que representa plasticitat perfecte en un model elàstic (Plaxis, 2014).....	8
Figura 5 Superfície de fluència Mohr-Coulomb a l'espai de tensions principals ($c=0$) (Plaxis, 2014).....	10
Figura 6 Criteri de trencament Mohr-Coulomb. (Carol, 2013)	12
Figura 7 Esquema conceptual de l'estabilitat d'un pla inclinat (Ortuño, 2003)	13
Figura 8 Mètode de les seccions. (Alonso, E. & Prat, P.C., 2005)	16
Figura 9 Elements que caracteritzen la malla.....	21
Figura 10 Passos d'anàlisi dels elements finits.	21
Figura 11 Geometria del talús corresponent al cas 1.....	25
Figura 12 Finestra per definir propietats i el tipus d'anàlisi. Programa GEO-SLOPE.	26
Figura 13. Malla que es crea per aquesta geometria. Programa PLAXIS.....	26
Figura 14 Cas 1.H=0m, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	28
Figura 15 Cas 1.H=0m, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	29
Figura 16 Cas 1.H=0m, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	30
Figura 17 Cas 1.H=0m, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	31
Figura 18 Cas 1.H=0m, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	32
Figura 19 Cas 1.H=0m, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	33
Figura 20 Cas 1.H=0m, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	34
Figura 21 Cas 1.H=0m, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	35
Figura 22 Cas 1.H=0m, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	36
Figura 23 Cas 1.H=0m, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	37
Figura 24 Cas 1.H=0m, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	38
Figura 25 Cas 1.H=0m, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	39

Figura 45 Cas 1.H=5m, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	59
Figura 46 Cas 1.H=5m, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	60
Figura 47 Cas 1.H=5m, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	61
Figura 48 Cas 1.H=5m, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	62
Figura 49 Cas 1.H=5m, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	63
Figura 50 Cas 1.H=8m, $\varphi = 12^\circ$ i $c = 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	64
Figura 51 Cas 1.H=8m, $\varphi = 12^\circ$ i $c = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	65
Figura 52 Cas 1.H=8m, $\varphi = 12^\circ$ i $c = 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	66
Figura 53 Cas 1.H=8m, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	67
Figura 54 Cas 1.H=8m, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	68
Figura 55 Cas 1.H=8m, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	69
Figura 56 Cas 1.H=8m, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	70
Figura 57 Cas 1.H=8m, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	71
Figura 58 Cas 1.H=8m, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	72
Figura 59 Cas 1.H=8m, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	73
Figura 60 Cas 1.H=8m, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	74
Figura 61 Cas 1.H=8m, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 36$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	75
Figura 62 Cas 1.H=10m, $\varphi = 12^\circ$ i $c = 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	76
Figura 63 Cas 1.H=10m, $\varphi = 12^\circ$ i $c = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	77

Figura 64 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c = 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	78
Figura 65 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	79
Figura 66 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	80
Figura 67 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	81
Figura 68 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	82
Figura 69 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	83
Figura 70 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	84
Figura 71 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	85
Figura 72 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	86
Figura 73 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	87
Figura 74 Geometria del talús corresponent al cas 2.	88
Figura 75 Finestra per definir propietats i el tipus d'anàlisi. Programa GEO-SLOPE.	89
Figura 76 Malla que es crea per aquesta geometria. Programa PLAXIS.	89
Figura 77 Cas 2. $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 6,75 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	90
Figura 78 Cas 2. $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 13,5 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	91
Figura 79 Cas 2. $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 20,25 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-	
SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	92
Figura 80 Cas 2. $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	93
Figura 81 Cas 2. $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 33,75 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-	
SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	94
Figura 82 Cas 2. $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 40,5 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	95
Figura 83 Cas 2. $c_1 = 18 \text{ kPa}$ i $c_2 = 9 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	96

Figura 84 Cas 2. $c_1 = 18 \text{ kPa}$ i $c_2 = 18 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	97
Figura 85 Cas 2. $c_1 = 18 \text{ kPa}$ i $c_2 = 27 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	98
Figura 86 Cas 2. $c_1 = 18 \text{ kPa}$ i $c_2 = 36 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	99
Figura 87 Cas 2. $c_1 = 18 \text{ kPa}$ i $c_2 = 45 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	100
Figura 88 Cas 2. $c_1 = 18 \text{ kPa}$ i $c_2 = 54 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	101
Figura 89 Cas 2. $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 11,25 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-	
SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	102
Figura 90 Cas 2. $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 22,5 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	103
Figura 91 Cas 2. $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 33,75 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-	
SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	104
Figura 92 Cas 2. $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 45 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	105
Figura 93 Cas 2. $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 56,25 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	106
Figura 94 Cas 2. $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 67,5 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	107
Figura 95 Cas 2. $c_1 = 27 \text{ kPa}$ i $c_2 = 13,5 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	108
Figura 96 Cas 2. $c_1 = 27 \text{ kPa}$ i $c_2 = 27 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	109
Figura 97 Cas 2. $c_1 = 27 \text{ kPa}$ i $c_2 = 40,5 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	110
Figura 98 Cas 2. $c_1 = 27 \text{ kPa}$ i $c_2 = 54 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	111
Figura 99 Cas 2. $c_1 = 27 \text{ kPa}$ i $c_2 = 67,5 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	112
Figura 100 Cas 2. $c_1 = 27 \text{ kPa}$ i $c_2 = 81 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE.	
(b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.	113
Figura 101 Geometria del talús corresponent al cas 3	114
Figura 102 Finestra per definir propietats i el tipus d'anàlisi. Programa GEO-SLOPE.	115
Figura 103 Geometria del talús corresponent al cas 3	115

Figura 104 Cas 3. $s = 5$ metres. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.....	116
Figura 105 Cas 3. $s = 10$ metres. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.....	117
Figura 106 Cas 3. $s = 15$ metres. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.....	118
Figura 107 Cas 3. $s = 20$ metres. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.....	119
Figura 108 Cas 3. $s = 25$ metres. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.....	120
Figura 109 Cas 3. $s = 30$ metres. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.....	121
Figura 110 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i H_w . ($\varphi = 12^\circ$).....	123
Figura 111 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i H_w . ($\varphi = 20^\circ$).....	123
Figura 112 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i H_w . ($\varphi = 30^\circ$).....	124
Figura 113 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i H_w . ($\varphi = 40^\circ$).....	124
Figura 114 Comparació els factors de seguretat de tots els casos.	126
Figura 115 Comparació els factors de seguretat per els diferents valors de C_1	126
Figura 116 Comparació dels factors de seguretat del cas 3.	127
Figura 117 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	133
Figura 118 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	134
Figura 119 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	135
Figura 120 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	136
Figura 121 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	137
Figura 122 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	138
Figura 123 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	139
Figura 124 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	140
Figura 125 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	141
Figura 126 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	142
Figura 127 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	143
Figura 128 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	144
Figura 129 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	145
Figura 130 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	146
Figura 131 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	147
Figura 132 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	148
Figura 133 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	149
Figura 134 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	150
Figura 135 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C_2=18$ kPa, (b) $C_2=27$ kPa i (c) $C_2=36$ kPa	151

Figura 136 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a)C2=18 kPa, (b)C2=27 kPa i (c)C2=36 kPa	152
Figura 137 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. C1=13,5kPa. (a)C2=6,75kPa, (b)C2=13,5kPa i (c)C2=20,25kPa	153
Figura 138 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. C1=13,5kPa. (a)C2=27kPa, (b)C2=33,75kPa i (c)=40,5kPa	154
Figura 139 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. C1=18kPa. (a)C2=9 kPa,(b)C2=18 kPa i (c)=27kPa.....	155
Figura 140 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. C1=18kPa. (a)C2=36kPa, (b)C2=45kPa i (c)=54kPa.....	156
Figura 141 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. C1=22,5kPa. (a)C2=11,25kPa, (b)C2=22,5kPa i (c)=33,75kPa	157
Figura 142 Desplaçaments totals. Prog.PLAXIS. C1=22,5kPa. (a)C2=45kPa, (b)C2=56,25kPa i (c)=67,5kPa	158
Figura 143 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. C1=27kPa. (a)C2=13,5kPa, (b)C2=27kPa i (c)=40,5kPa.	159
Figura 144 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. C1=27kPa. (a)C2=54 kPa, (b)C2=67,5kPa i (c)=81kPa...	160
Figura 145 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS.(a)S=5m, (b)S=10m i (c)=15m.....	161
Figura 146 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS.(a)S=20m, (b)S=25m i (c)=30m.....	162

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1 Paràmetres bàsics del model constitutiu Mohr-Coulomb	11
Taula 2 valors de cohesió per el material	25
Taula 3 Resum dels paràmetres introduïts per aquest cas 1.....	27
Taula 4 Valors de cohesió de l'argila 1depenen del valor α	88
Taula 5 Valors de la cohesió de l'argila 2 depenent de la relació amb l'argila 1	88
Taula 6 Resum dels paràmetres introduïts per aquest cas 2.....	89
Taula 7 valors de les distàncies de les esquerdes.....	114
Taula 8 Resum dels paràmetres introduïts per aquest cas 3.....	115
Taula 9 Resum dels factors de seguretat dels 60 cassos del cas 1. Programes GEO-SLOPE i PLAXIS.	122
Taula 10 Resum dels factors de seguretat dels 24 cassos del cas 2. Programa GEO-SLOPE	125
Taula 11 Resum dels factors de seguretat dels 24 cassos del cas2. Programa PLAXIS.....	125
Taula 12 Resum dels factors de seguretat dels 12 cassos del cas 3. Programes GEO-SLOPE i PLAXIS.	127

1 INTRODUCCIÓ

1.1 ANTECEDENTS

En els darrers anys la demanda d'obra civil i la construcció de noves infraestructures que hi ha hagut ha sigut molt gran. Partim, doncs, d'una actualitat en la qual la relació entre el terreny i els elements antròpics com carreteres, ponts, cases i molts altres és molt estreta i cada cop es necessita la intervenció de més professionals per tal de que les tècniques que s'utilitzen siguin les òptimes i el risc al qual ens exposem sigui el mínim.

Actualment, la geotècnia i tota la enginyeria que s'aplica al terreny són fruit d'una evolució que en els darrers anys s'ha accelerat de manera exponencial gràcies a les millores de les tècniques de camp, laboratori i informàtiques. És en aquest darrer, on s'han produït els avanços més importants. La incorporació de l'ús de softwares específics per diferents casos ha fet possible reduir el marge d'error i augmentar el nombre d'iteracions que es necessitaven. L'execució d'operacions complexes s'han pogut resoldre de manera efectiva reduint els temps i eliminant els errors de càlcul. Podem combinar diferents paràmetres per trobar el resultat més òptim si el volum d'iteracions és més gran.

Però són molts els programes que han anat sortint al mercat als darrers anys. Els primers programes es caracteritzen per tenir un software més senzill degut a la poca capacitat de memòria. Mentre que els programes més recents tenen un software més desenvolupat però alhora necessiten ordinadors més potents.

Per poder millorar els programes actuals o crear de nous és important conèixer els que tenim, saber quines prestacions ofereixen i en quins casos podem treballar i alhora saber quines mancances tenen.

Per tant el següent estudi busca mitjançant l'anàlisi de l'estabilitat dels talussos la comparació de dos programes per donar a conèixer que és el que ens ofereixen un i en quins casos o quins passos limiten el resultat. Per realitzar aquesta comparació s'han agafat tres casos representatius els quals s'han realitzat diverses iteracions canviant algun dels paràmetres per finalment poder analitzar els diferents resultats i treure un petit informe de cadascun dels programes.

1.2 OBJECTIUS

El principal objectiu de la tesina es realitzar un estudi comparatiu entre el programa *GEO-SLOPE* i el programa *PLAXIS 2D AE* mitjançant els diferents valors dels factors de seguretat que obtenim a l'hora de realitzar un anàlisi d'estabilitat. Per poder prendre dades representatives ens hem centrat en tres casos que són bastants habituals a camp i donen grans problemes d'estabilitat.

En aquest estudi comparatiu es van plantejar els següents objectius:

- Conèixer i estudiar els diferents factors que afecten en una anàlisi d'estabilitat d'un talús.
- Avaluar tres casos pràctics mitjançant el programa GEOSLOPE amb el mètode d'equilibri límit, prenent diferents geometries, valors de cohesió i angles de fricció.
- Avaluar tres casos pràctics mitjançant el programa PLAXIS amb el mètode d'equilibri límit, prenent diferents geometries, valors de cohesió i angles de fricció.
- Comparar els factors de seguretat obtinguts en els dos programes i analitzar el resultat.

1.3 ESTRUCTURA DEL TREBALL

Aquesta tesina està estructurada en tres parts:

1. La primera part correspon als capítols 2 i 3 i l'objectiu és donar una breu introducció a l'estabilitat de talussos. En el capítol 2 s'han agafat els aspectes que s'han considerat més importants a l'hora de realitzar un estudi d'estabilitat d'un talús com la resistència al tall del sòl, el model i criteri de trencament de Mohr-Coulomb, els efectes que té l'aigua a l'estabilitat i el concepte de factor de seguretat. En el capítol 3 s'expliquen els dos mètodes que utilitzen cadascun dels programes amb els que es realitzarà l'estudi, l'equilibri límit i d'elements finits.
2. La segona part la forma el capítol 4 que conté una breu introducció dels programes PLAXIS 2D AE i GEO-SLOPE. A continuació l'avaluació dels diferents casos amb les variacions de paràmetres per tal d'obtenir un gran nombre de possibilitats i poder fer un estudi comparatiu. El primer cas pràctic s'avalua l'efecte de la variació de la cota de la làmina d'aigua, el segon és en un sòl argilós sec i el tercer tracta sobre les esquerdes a la part superior del talús.
3. La última part la formen els capítols 5 i 6 i és on s'avaluen els resultats i on s'estableixen les conclusions i també on es proposen futures línies de treball.

2 ESTABILITAT DEL TALÚS

2.1 ASPECTES GENERALS

Un talús és aquella superfície inclinada respecte la horitzontal que adopta permanentment aquesta estructura del terreny. Així doncs, un talús tindrà les seves capes estratificades i estructures geològiques concretes i estarà sotmès a l'acció de pressió dels porus en el cas de presència d'aigua. Un talús representa una estructura complexa en el terreny ja que el seu anàlisi i estudi depenen de la mecànica de sòls, mecànica de roques i de la pròpia geologia aplicada on la formulació ha d'estar dins d'un criteri acceptable. Aquests anàlisis es tenen en compte alhora d'iniciar una obra d'enginyeria o simplement per conèixer l'estabilitat del talús per determinar si és segur o és tracta d'una zona inestable. Si es determina que es tracta d'una zona inestable s'haurien de prendre mesures tant preventives, si encara no hi ha hagut cap moviment del terreny, com correctores o estabilitzadores, si el talús ja ha presentat algun comportament inestable. L'objectiu d'ambdues mesures és que el talús no acabi trencant i provocant un desplaçament de terres que no estigui controlat i arribi a afectar tant a les infraestructures civils com carreteres i ponts o bé poblacions en les quals es podrien veure involucrades les vides de persones.

L'origen i història del talús és important alhora de realitzar els estudis de la seva estabilitat. És important caracteritzar bé el medi sedimentari i el conjunt de processos posteriors al qual s'ha vist afectat i alterat i on finalment ens ha donat unes fàcies sedimentaries característiques, amb uns paràmetres del terreny concrets. Aquest estudi de la diagènesis del terreny ens porta a classificar dos grans grups de talussos segons el seu origen: 1. Talús d'origen natural, en el qual l'acció humana no ha intervingut, 2. Talús artificial fruit de l'acció antròpica.

El material dels talussos defineix el comportament d'aquest. Poden ser roques i sòls. Sota unes mateixes condicions aquests materials donen respostes diferents quan es produeix mecanisme de trencament. Els paràmetres que els caracteritzen són claus alhora de realitzar aquest estudi.

S'entén per estabilitat, la seguretat d'una massa de terra contra el seu moviment. El resultat del desplaçament d'un talús pot arribar a ser catastròfic i és per això que es realitzen estudis d'estabilitat. Donar un valor d'angle del talús massa petit per assegurar la estabilitat pot no ser econòmic, ja que els moviments de terres tenen un cost elevat i s'intenta ajustar aquest angle perquè el desmunt de terres sigui mínim.

Per determinar aquesta estabilitat es tenen en compte les principals forces que actuen a sobre el talús. La força que sempre actua és la de la gravetat i per tant el coeficient de seguretat que volem calcular serà la resultant de tenir en compte el pes propi de la massa del sòl que afecta al talús i les possibles forces que es trobin sobrecarregant el talús. Aquest coeficient o factor de seguretat quan és igual a 1 es considera que és un talús que en equilibri, però sempre es recomanable que aquest factor sigui igual o major a 1,5. El factor de seguretat es defineix com el coeficient entre la resistència a tall del talús i les forces motores que provocarien el desplaçament de tota la massa de terra.

Quan s'obté el valor del factor de seguretat s'assumeix que és igual per a tots els punts que component la superfície de trencament. Aquest número de factor de seguretat és amb el que treballem, es tracta d'una valor mitjà del valor total de tota la superfície de trencament. Per qualsevol anàlisi quantitatiu d'estabilitat és necessari recórrer a aquest coeficient de seguretat sigui quin sigui el mètode de càlcul utilitzat.

Existeix un punt d'incertesa alhora de saber quin són realment els paràmetres reals que componen el sòl, és per això que normalment es parla de marges de seguretat.



Figura 1 Talús en carretera (Blogdeenergia/carreteras, 2009)

2.2 PARÀMETRES DEL SÒL

La resistència a tracció dels sòls és pràcticament nul·la, només en alguns casos especials com els sòls cimentats, que tenen un comportament quasi com el de les roques o els sòls parcialment saturats, que tenen la unió de partícules per meniscos capil·lars, tenen una importància dels estats de tracció. Es per això que els estudis es centren en el trencament o deformacions relatives entre partícules, que a gran escala es tradueix com les deformacions de tall. Quan parlem de la resistència del sòl ens referirem a la resistència al tall. La resistència al tall d'una massa del sòl és la resistència interna per àrea unitària que la massa del sòl ofereix per resistir la falla i el desplaçament en qualsevol pla dins del sòl. (Das, 2013)

Els principals paràmetres de la resistència al tall són els següents:

- Paràmetres de resistència:
 - a. Angle de fricció: L'angle de fricció és un paràmetre important dins la mecànica de sòls i s'utilitza en molts procediments de disseny d'estructures geogèniques. És la representació matemàtica del coeficient de fricció. Aquest angle depèn de diversos factors, entre els més importants, tenim la mida i forma dels grans, la distribució de la mida dels grans, la densitat del material i la orientació dels grans. El valor de l'angle de fricció caracteritza de manera representativa cada tipus de sòl i es determina a laboratori o a camp, mitjançant correlacions i gràfics o a partir de taules en el cas de no tenir suficient informació.
 - b. Angle de dilatància: L'angle de la dilatància pot tenir una influència significativa a la modelització del comportament del sòl, especialment en sorres denses i argiles molt consolidades. Donat que, de manera general, la dilatància correspon a un fenomen de sòls granulars és recomanable utilitzar el valor de zero graus per aquests paràmetres.
 - c. Cohesió: la cohesió és una mesura de la cimentació o adherència entre les partícules del sòl. La cohesió dins la mecànica de sòls és utilitzada per representar la resistència al tall produïda per la cimentació. El valor de la cohesió és zero quan parlem d'argiles normalment consolidades. No obstant, en els càlculs hardware és millor valor lleugerament més grans per un millor càlcul numèric. En el cas de tenir sòls no saturats, l'aigua en els porus produeix un fenomen d'adherència per pressions negatives o forces capil·lars conegut com cohesió aparent. Aquest cohesió desapareix amb la saturació del sòl.

- d. Tensió efectiva: Una massa de sòl saturada conté dues fases diferents: l'esquelet de partícules i els porus entre partícules plens d'aigua. Qualsevol esforç que s'apliqui al sòl el suportarà l'esquelet de partícules i la pressió a l'aigua. L'esquelet pot transmetre els esforços normals i de tall pels punts de contacte entre les partícules i l'aigua pot exercir la pressió hidrostàtica, la qual es igual en totes les direccions. Els esforços que són produïts per l'esquelet de partícules només són coneguts per esforços efectius mentre que els esforços hidrostàtics de l'aigua es denominen pressió d'aigua de porus $[\mu]$. Els esforços efectius són els que controlen el comportament del sòl i no els esforços totals. A la pràctica es pot utilitzar per analitzar estabilitats a curt termini o problemes dels quals sigui difícil separar la tensió total en els seus components. Els esforços efectius s'han d'analitzar en tot tipus d'anàlisi d'estabilitat (sempre que hi hagi presència d'aigua) especialment en estabilitats a llarg termini.

Des de el punt de vista esforç- deformació, s'han de tenir en compte tres tipus de resistència:

- i. Resistència màxima o de pic: És la resistència al tall màxima que té un material que no ha patit un trencament del terreny prèviament. Correspon al punt més alt de corba esforç-deformació tal i com es veu a la Figura 2. La utilització de la resistència pic en l'anàlisi de l'estabilitat assumeix que aquesta resistència s'obté simultàniament al llarg de la superfície de trencament. No obstant, alguns punts de la superfície tenen deformacions més grans que altres i això pot conduir a errors de càlcul de l'estabilitat d'un talús.
- ii. Resistència residual: és la resistència de tall que té un material després del trencament, especialment en argiles sobreconsolidades. Es recomanable utilitzar aquest valor de la resistència residual en el càlcul de certs factors de seguretat, amb paràmetres també residuals com l'angle de fricció ϕ_r o la cohesió. c_r . Tot i que en sols residuals la diferència entre la resistència pic i la resistència residual és molt petita.

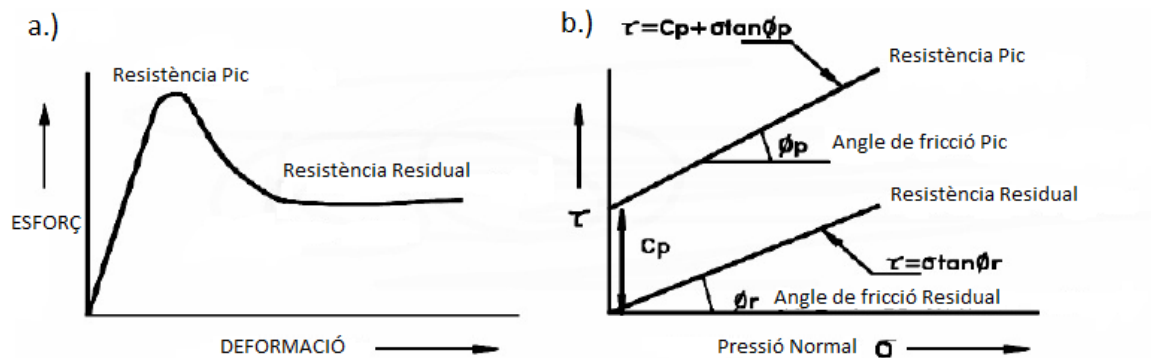


Figura 2 a.) Gràfica esforç-deformació. b.) Gràfica dels diferents angles de fricció

- Paràmetres elàstics:

- Mòdul de Young: La llei de Hooke relaciona la deformació ϵ_x d'una barra sotmesa a un esforç normal, amb la tensió normal generada per aquest esforç σ , mitjançant la constant E , que es denomina *mòdul de elasticitat lineal* o *mòdul de Young*. La rigidesa d'un material queda caracteritzada per la relació entre l'esforç σ_x i la deformació ϵ_x , és a dir el mòdul de Young.

$$E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} = \frac{F/A}{\Delta x/x} \quad (\text{Eq. 1})$$

- Coefficient de Poisson: Tot element que està sotmès a una càrrega axial experimenta una deformació no només en el sentit en el qual està sotmès (deformació primària ϵ_x) sinó que també, segon l'eix perpendicular (deformació secundària ϵ_y i ϵ_z) o sigui, tota la tracció longitudinal amb allargament implica una contracció transversal (disminució de la secció de l'element estirat). La relació de Poisson efectiva pot ser avaluada a través de la realització d'un assaig triaxial drenat, mesurant les diferents variables de deformació unitària. El coeficient de Poisson és la relació de la deformació perpendicular a la axial.

$$\nu = -\frac{\epsilon_p}{\epsilon_a} \quad (\text{Eq. 2})$$

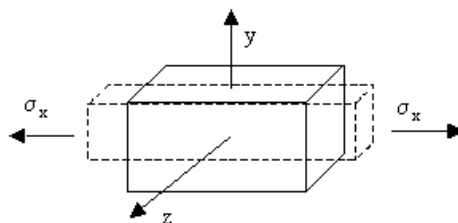


Figura 3 Esquema pel mòdul de Young i coeficient de Poisson

2.3 MODEL CONSTITUTIU

El model constitutiu Mohr-Coulomb es considera com una aproximació del comportament no lineal del sòl. El concepte de plasticitat està associat a les deformacions irreversibles. Per tal d'avaluar si es produeix o no la plasticitat en un càlcul, s'introdueix una funció de fluència f com una funció de la tensió i de la deformació. El cas de $f = 0$ és la condició per la deformació plàstica. Aquesta condició es presenta com una superfície a l'espai de tensions principals. La Figura 4 representa un model de plasticitat perfecte. Aquest model constitutiu té una superfície de fluència fix i per tant està definida pels paràmetres del model i no està afectada per la deformació (plàstica). Els estats de tensions representats per punts dins la superfície de fluència, el comportament és purament elàstic i totes les deformacions són reversibles.

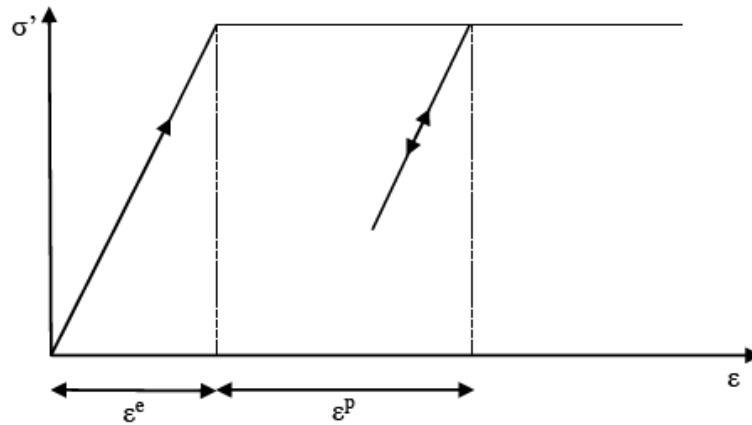


Figura 4 Esquema que representa plasticitat perfecta en un model elàstic (PLAXIS, 2014)

El principi bàsic de elastoplasticitat planteja que les deformacions i els increments de deformacions es poden descompondre en una part elàstica i una part plàstica:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p \quad (\text{Eq. 3})$$

D'acord amb la teoria clàssica de la plasticitat, els increments de deformació plàstica són proporcionals a la derivada de la funció de fluència respecte les tensions.

$$\dot{\sigma}' = D^e \dot{\epsilon}^e = D^e (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^p) \quad (\text{Eq. 4})$$

Les velocitats de deformació plàstica es poden representar com vectors perpendiculars a la superfície de fluència. Aquesta forma clàssica de la teoria es coneix amb el nom de plasticitat associada. Per les funcions de fluència del tipus Mohr-Coulomb, la teoria de la plasticitat associada sobreestima la dilatància. I a més de la funció de fluència s'introdueix una funció potencial plàstica g . El cas $f \neq g$ es denomina com plasticitat no associada.

En general, els increments de deformacions plàstica són,

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}^p}} = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma'}}} \quad (\text{Eq. 5})$$

On λ és el multiplicador plàstic. Per el comportament purament elàstic λ és zero, mentre que en el cas de comportament plàstic λ és positiu:

Comportament totalment elàstic	$\lambda = 0$	$f < 0, \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma'}}} \underline{\underline{D}}^e \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} \leq 0$	Eq. 6
--------------------------------	---------------	---	-------

Comportament plàstic	$\lambda > 0$	$f = 0, \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma'}}} \underline{\underline{D}}^e \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} > 0$	Eq. 7
----------------------	---------------	--	-------

Aquestes equacions es poden utilitzar per obtenir la següent relació entre els increments de tensió efectiva i la velocitat de deformació per l'elastoplasticitat.

$$\dot{\underline{\underline{\sigma'}}} = \underline{\underline{D}}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{\underline{D}}^e \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma'}}} \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma'}}} \underline{\underline{D}}^e \right) \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} \quad (\text{Eq. 8})$$

On

$$d \left(\frac{\partial f^T}{\partial \underline{\underline{\sigma'}}} \underline{\underline{D}}^e \right) \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma'}}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Si el paràmetre α és igual a zero estem en un material que té comportament elàstic mentre que per la plasticitat el valor de α és igual a la unitat. La condició de fluència de Mohr-Coulomb és una extensió de la llei de fricció de Coulomb per els estats generals de tensió. De fet, aquesta condició assegura que per qualsevol pla dins d'un element material es compleixi aquesta llei.

La condició de fluència completa de Mohr-Coulomb consta de sis funcions de fluència quan es formula en termes de tensions principals:

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (\text{Eq. 10})$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (\text{Eq. 11})$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (\text{Eq. 14})$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (\text{Eq. 15})$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_k - \sigma'_j) + \frac{1}{2}(\sigma'_k - \sigma'_j) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (\text{Eq. 16})$$

Els dos paràmetres plàstics del model que apareixen en les funcions de fluència són l'angle de fricció φ i la cohesió c . La condició $f_i = 0$ per totes les funcions de fluència (on f_i s'utilitza per cada funció individual de fluència) representa un con hexagonal en l'espai de tensions principals com es mostra a la següent figura.

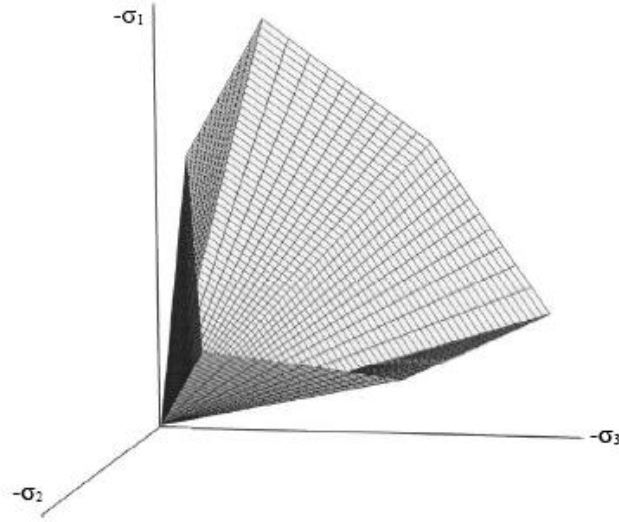


Figura 5 Superfície de fluència Mohr-Coulomb a l'espai de tensions principals ($c=0$) (PLAXIS, 2014)

A més de les funcions de fluència, existeixen sis funcions de potencial plàstic que es defineixen per el model de Mohr-Coulomb:

$$g_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) \sin \psi \quad (\text{Eq. 17})$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) \sin \psi \quad (\text{Eq. 18})$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) \sin \psi \quad (\text{Eq. 19})$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin \psi \quad (\text{Eq. 20})$$

$$g_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) \sin \psi \quad (\text{Eq. 21})$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) \sin \psi \quad (\text{Eq. 22})$$

Les funcions de potencial plàstic contenen un tercer paràmetre de plasticitat, l'angle de dilatància ψ . Aquest paràmetre es necessari per modelar increments positius de deformacions volumètriques plàstiques observat en sòls densos.

El model elastoplàstic de Mohr-Coulomb exigeix cinc paràmetres que es poden obtenir a partir dels assajos bàsics del sòl.

Taula 1 Paràmetres bàsics del model constitutiu Mohr-Coulomb

Angle de fricció	c	KN/m ²
Cohesió del terreny	φ	°
Angle de dilatància	ψ	°
Mòdul de Young	E	KN/m ²
Relació de Poisson	ν	-

- *Criteri de trencament*

Els primers estudis sobre la resistència al tall dels sòls varen ser realitzats per Coulomb. Ell va plantejar que quan un terreny trenca ho fa a través d'una superfície plana inclinada. És interessant conèixer quina és la resistència al lliscament al llarg d'aquest pla de trencament, i això Coulomb ho planteja com quan tenim dos cossos sòlids es produeix una força tangencial que arriba a tenir un valor T_r proporcional a la força normal N sent la constant de proporcionalitat denominada coeficient de fricció entre les dues superfícies μ :

$$T_r = \mu \cdot N \quad (\text{Eq. 23})$$

El criteri de trencament diu que la resistència al tall té dos components bàsics dels quals depèn que és la cohesió del terreny i l'angle de fricció. L'angle de fricció depèn principalment de la tensió efectiva normal sobre el pla de trencament. Aquesta teoria diu que la resistència al tall que es pot produir una roca en un pla que forma un angle β amb la tensió principal menor σ_3 es pot veure expressada mitjançant la següent fórmula:

$$\tau_{cr} = c + \sigma'_n \tan \varphi \quad (\text{Eq. 24})$$

El trencament es produeix quan la tensió tangencial τ és més gran que la resistència al tall crítica τ_{cr} la qual té una component d'origen friccional, $\sigma'_n \tan \varphi$, que depèn de la tensió normal efectiva, σ'_n sobre el pla i d'un angle de fricció φ . També té una component c , independent de σ'_n .

El criteri de Mohr-Coulomb en termes de tensions efectives correspon a l'eq. 25 i poden veure representats els seus components a la Figura 6.

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \left[\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} + \frac{c'}{\tan \varphi'} \right] \sin \varphi' \quad (\text{Eq. 25})$$

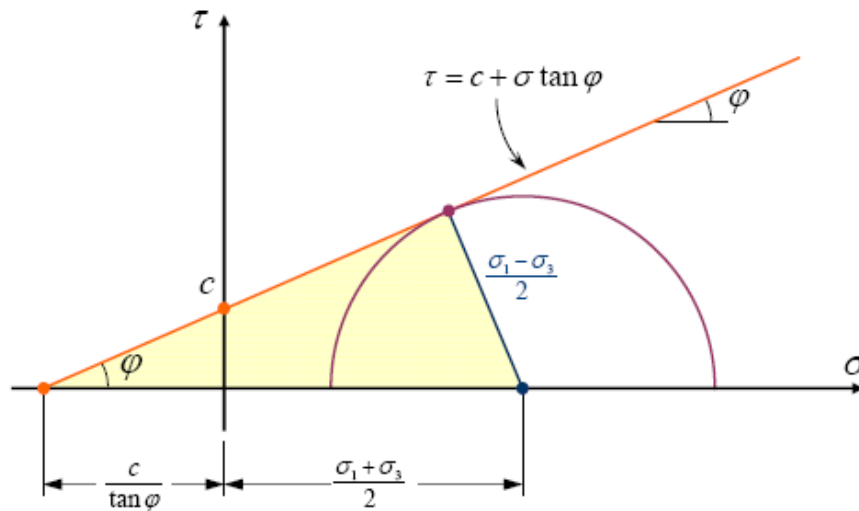


Figura 6 Criteri de trencament Mohr-Coulomb. (Carol, 2013)

En cas de que la roca estigui sotmesa a tracció enlloc de al tall, s'haurà de determinar mitjançant els resultats dels assajos de tracció realitzats al laboratori amb la roca en qüestió. Aquest model de Mohr-Coulomb és el model bàsic que s'utilitza més alhora de determinar certs paràmetres en la geotècnica, tot i que té certes limitacions com són la poca capacitat per reproduir els canvis de rigidesa del sòl i per modelar les situacions on tenim diferents trajectòries d'esforços.

2.4 EFECTES DE L'AIGUA A L'ESTABILITAT

L'aigua és un dels principals factors que influeix en l'estabilitat del terreny. L'acció o efectes que provoquen el flux o l'escorrentia de l'aigua són importants i no sempre són identificats correctament. Els problemes que provoca l'aigua sobre la roca o el sòl són:

- Augment del pes del material per la seva saturació
- Reducció de la resistència al tall dels plans de trencament per la disminució de la tensió normal total
- Augment de la tracció per les esquerdes que es troben localitzades a la part superior d'un talús que es formen per acumulació d'aigua després de pluja o per escorrentia superficial
- Obertura de les discontinuïtats a causa de la congelació de l'aigua acumulada
- Meteorització
- Canvis en la composició mineralògica dels materials.

Un dels principals efectes de l'aigua és l'augment de pes del terreny que provocarà un augment de la tensió de tall. La resistència de tall determinarà si el sòl es capaç de compensar aquesta augment de la tensió de tall que provocarà unes compressions al terreny. El principal factor que afecta a aquestes compressions és la consolidació del sòl. Conèixer si estem davant d'un sòl normalment consolidat o sobreconsolidat

Un altre factor important que determina la influència de l'aigua és la permeabilitat ja sigui vertical o horitzontal. Si tenim una massa de sòl que està saturada però amb una permeabilitat baixa, pràcticament no tindrem cap canvi del volum del sòl, excepte quan ens referim a un estudi a llarg termini que aleshores poden aparèixer canvis en les tensions per què l'aigua que es troba en els porus, que està sotmesa a tensions, flueix cap a un altre sòl.

2.5 FACTOR DE SEGURETAT

El factor de seguretat no té una única definició ja que depèn del mètode de càlcul que utilitzem per la seva estimació. Així doncs, segons el mètode que s'utilitzi per l'anàlisi és pot considerar de dues maneres:

1. Definit com una relació de forces

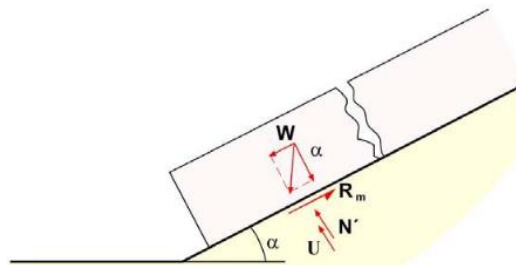


Figura 7 Esquema conceptual de l'estabilitat d'un pla inclinat (Ortuño, 2003)

$$F = \frac{\sum \text{Forces estabilitzadores}}{\sum \text{Forces desestabilitzadores}} = \frac{c' L + (W \cos \alpha - U) \tan \varphi'}{W \sin \alpha} \quad (\text{Eq. 26})$$

On:

- a. W : pes de la massa del sòl
- b. α : Angle que forma la massa del sòl respecte l'horitzontal
- c. U : Resultant de les pressions intersticials a la superfície de trencament
- d. N : Resultant de les tensions efectives normals a la superfície de trencament

2. Definit com una reducció de la resistència al tall del terreny

Aquest factor és el que definirem pels talussos constituïts amb sòls, ja que parteix del criteri de Mohr-Coulomb segons el qual defineix el factor de seguretat com la relació entre la resistència al tall màxima disponible al terreny (τ_f) al llarg de la superfície de trencament potencial i l'estrictament necessari (τ_m) o mobilitzada per aconseguir l'equilibri elàstic o límit del mecanisme considerat, és a dir la resistència de tall mínima necessària perquè el terreny sigui estable.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (\text{Eq. 27})$$

On:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (\text{Eq. 28})$$

$$\tau_m = \frac{c'}{F} + \sigma' \frac{\tan \varphi'}{F} = c'_m + \sigma' \tan \varphi'_m \quad (\text{Eq. 29})$$

El factor de seguretat és el que s'obté dels dos programes i és amb el que treballem a l'hora de comparar. Es per això que hem de saber de quina manera calculen el factor de seguretat cadascun d'ells. El programa GEO-SLOPE treballa amb el primer mètode ja que busca el factor de seguretat fent l'equilibri de forces, mentre que PLAXIS utilitzar la reducció de la resistència al tall per trobar el factor de seguretat. Aquesta equació del mètode que utilitza PLAXIS la tenim simplificada a (Eq. 30).

$$FS = \frac{c - \sigma_n \tan \varphi}{c_r - \sigma_n \tan \varphi_r} \quad (\text{Eq. 30})$$

On c i φ són paràmetres de resistència d'entrada i σ_n és el component de tensió normal. Els valors de c_r i φ_r són paràmetres reduïts de resistència suficientment grans per mantenir l'equilibri. El principi descrit és la base del mètode de seguretat que es pot utilitzar en PLAXIS per calcular el factor de seguretat. La cohesió i l'angle de fricció es redueixen en la mateixa proporció:

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = FS_{PLAXIS} \quad (\text{Eq. 31})$$

3 MÉTODES DE CàLCUL

Els mètodes de càlcul tenen dues classificacions depenen de les equacions que satisfacin. Una primera classificació és:

1. Mètodes de càlcul de deformacions: són mètodes que treballen amb equacions d'equilibri i les deformacions. (*Mètode d'elements finits*)
2. Mètodes d'equilibri límit: són mètodes que treballen amb les equacions d'equilibri. (*Mètode d'equilibri límit*)

Una segona classificació on es diferencien els mètodes exactes o no exactes:

1. Mètodes exactes: s'apliquen la llei d'equilibri. (els mètodes que ho compleixen són les simplificacions dels mètodes d'equilibri límit)
2. Mètodes no exactes: no només s'apliquen les lleis d'equilibri. Es tracta d'un problema hiperestàtic i normalment es resol per geometria.
 - a. *Equilibri global de la massa que es desplaça*. Es treballa amb tensions normals a la superfície de trencament.
 - b. *Mètode de les seccions*:
 - i. Mètodes aproximats: no compleixen totes les equacions d'equilibri
 1. *Fellenius*
 2. *Janbu*
 3. *Bishop simplificat*
 - ii. Mètodes precisos o complets: compleixen les equacions d'equilibri
 1. *Spencer*
 2. *Bishop modificat*
 3. *Morgenstern-Price*

Els mètodes que utilitzem pel nostre estudi comparatiu pren el mètode d'elements finits que es el que utilitza el programa PLAXIS. D'aquest mètode podrem obtenir les deformacions ja que el programa ens dona l'opció de veure com es deforma la malla creada al terreny. En el cas del programa GEO-SLOPE treballa amb el mètode d'equilibri límit i en concret amb el mètode de les seccions. Per cadascun dels casos em definit un mètode diferent. Pel primer cas Spencer, pel segon Bishop i pel darrer cas Janbu.

3.1 EQUILIBRI LÍMIT

L'anàlisi de l'estabilitat de les estructures del terreny és el tipus més antic d'anàlisi numèrica dins el camp de l'enginyeria geotècnica. La idea de fer un símil entre un potencial de massa lliscant com si fossin seccions es va introduir a principis del segle vint. Al 1916, Petterson va presentar l'anàlisi de l'estabilitat de la Stigberg Quay a Göteborg, Suècia on es prenia la superfície de trencament com circular i dividia la massa lliscant en seccions. Durant les pròximes dècades, Fellenius (1936) va introduir el mètode ordinari o Suec de les seccions. A mitjans dels anys 1950, Janbu (1954) i Bishop (1955) van desenvolupar avenços en el mètode. La incorporació dels ordinadors electrònics a la dècada del 1960 va permetre gestionar més fàcilment els procediments iteratius que són necessaris en aquest mètode. Aquest fet va portar a la formulació matemàtica d'equacions més rigoroses com els desenvolupats per Morgenstern i Price (1965) i per Spencer (1967).

El problema en el mètode de la superfície de trencament circular desenvolupada per l'equilibri global d'una massa de sòl inestable es trobava matemàticament indeterminat al tenir més incògnites que equacions. Es llavors quan es planteja una nova hipòtesis de les tensions efectives i normals que actuen a tota la superfície de trencament. Fellenius va plantejar estudiar l'equilibri però no de tota la massa potencialment que lliscava sinó d'una sèrie de seccions verticals en les que la massa es dividiria.

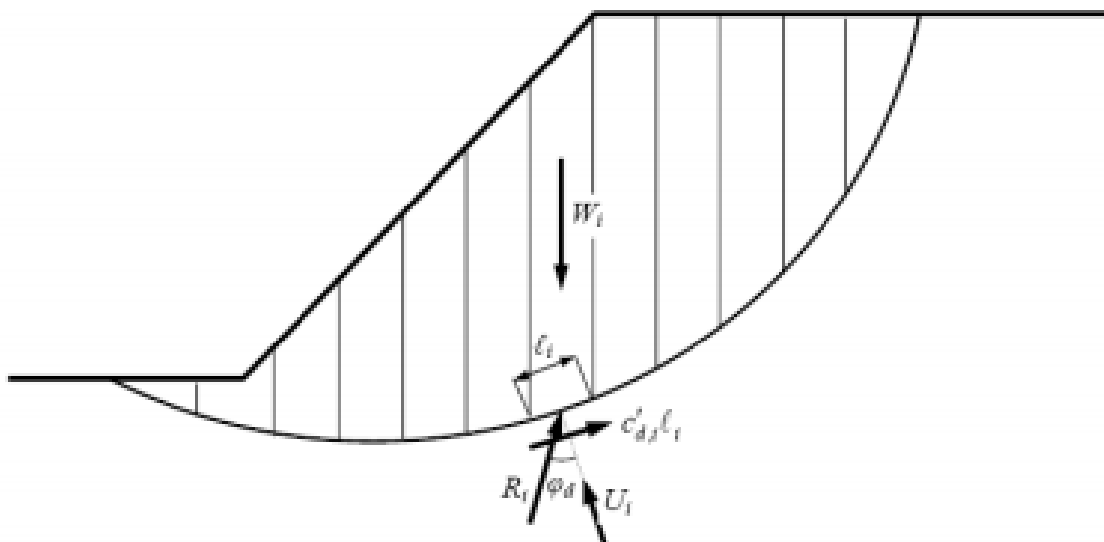


Figura 8 Mètode de les seccions.

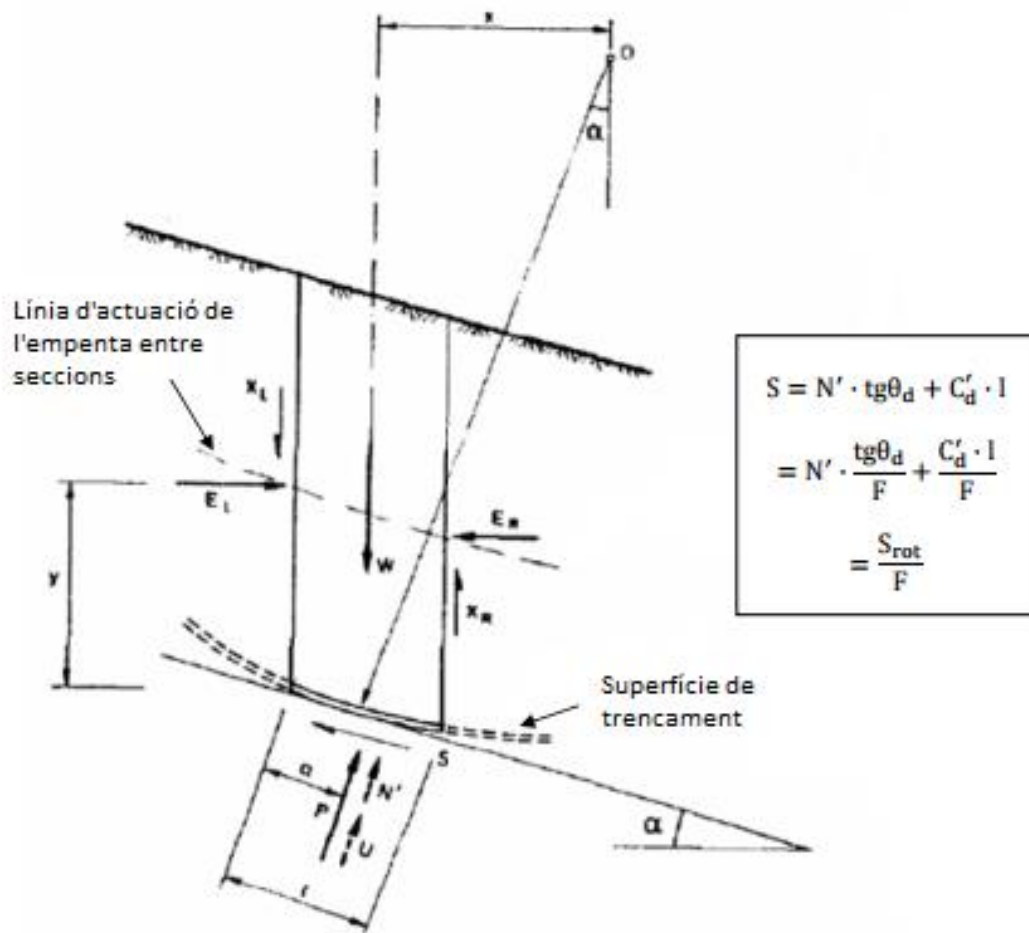


Figura 9 Forces sobre una llesca (costat dret de la secció: E_r, X_r i costat esquerre de la secció: E_L, X_L)

El que planteja és que la tensió normal en un punt qualsevol d'una superfície de trencament ha de dependre fonamentalment del pes del sòl que està per sobre d'ell. D'aquesta manera es divideix el terreny en seccions suficientment petites, i en les que es pugui calcular les forces normals de cada secció que actua en el punt mig de la seva base.

3.1.1 Mètode de Spencer

Inicialment, aquest mètode va ser presentat per resoldre superfícies de trencament circulars tot i que també pot analitzar superfícies no circulars si es considera un centre de rotació fictici. Amb aquest mètode s'obtenen dos factors de seguretat, un en el qual es consideren l'equilibri de forces i l'altre l'equilibri de moments. S'agafa una inclinació de forces entre les seccions de manera que els dos factors de seguretat coincideixin. Aquesta inclinació constant θ al llarg del vessant que,

$$X/E = \tan \theta \quad (\text{Eq. 32})$$

on tenim que X són les forces verticals i E les forces horitzontals. La força normal a la base de l'element serà:

$$P = \frac{\left[W(E_R - E_L) \cdot \tan \theta - \frac{1}{F} (c'l \sin i - ul \tan \varphi' \sin i) \right]}{\cos i \left(1 + \tan i \cdot \frac{\tan \varphi'}{F} \right)} \quad (\text{Eq. 33})$$

on F és el factor de seguretat definit com tensió de tall mobilitzada respecte la disponible, E_R i E_L són respectivament les forces horitzontals dreta i esquerra entre cada secció, u és la pressió de porus a la superfície de trencament, l és la longitud de la base de l'element de la seccions, i és la inclinació de la base de l'element, c i φ són la cohesió i l'angle de fricció a la superfície de trencament.

Suposant que l'angle θ és constant per a tots els elements del vessant, es pot fer tant l'equilibri global de moments com de forces, i per tant, tal i com havíem comentat, es troben dos valors de factors de seguretat, el equilibri de forces F_f i el de moments F_m . Spencer va estudiar la relació entre F_f i F_m per un problema tipus. Va arribar a la conclusió que el factor de seguretat resultant de l'equilibri de moments F_m és relativament insensible a les forces entre els elements.

3.1.2 Mètode Bishop Simplificat

El mètode de Bishop Simplificat (1955) és aplicable només per superfícies circulars de ruptura. Aquest mètode, a diferència de Bishop rigorós, considera com a zero l' ΔX , diferència de les forces verticals del costat esquerre i dret de la secció. La simplificat dels càlculs del mètode fa que sigui un dels mètodes més utilitzats a la pràctic enginyeril.

El punt de partida pel càlcul del factor de seguretat és:

$$F = \frac{\text{Forces disponibles}}{\text{Forces necessàries per l'equilibri}}$$

Apliquem primer l'equilibri global de moments

$$\sum S \cdot r = \sum W \cdot x = \sum W \cdot r \cdot \sin \varphi' \quad (\text{Eq. 34})$$

L'esforç de tall mobilitzat a la base, S , està relacionat amb el factor de seguretat mitjà

$$S = \frac{c'l + N' \tan \varphi'}{F} \quad (\text{Eq. 35})$$

Si substituïm (Eq. 34) i (Eq. 35) considerant que les seccions tenen igual gruix, s'obté

$$F = \frac{\sum(c'l + N' \tan \varphi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (\text{Eq. 36})$$

El paràmetre N' és desconegut. El valor va ser obtingut per Bishop aplicant la condició d'equilibri vertical de forces a cada secció. En aquest moment és on es diferencien els mètodes de Bishop simplificat i Rigorós. El primer considera ΔX igual a zero, en canvi el segon considera unes hipòtesis per la estimació d'aquest valor. Considerant Bishop Simplificat,

$$W + \Delta X = S \sin \alpha + N' \cos \alpha + U \cos \alpha \quad (\text{Eq. 37})$$

Substituint S pel seu valor en (Eq. 35) i aïllant N' s'obté:

$$N' = \frac{W - \left[\frac{c' \cdot l \cdot \sin \alpha}{F} + U \cdot \cos \alpha \right]}{\cos \alpha + \frac{\tan \varphi' \cdot \sin \alpha}{F}} \quad (\text{Eq. 38})$$

Finalment el Factor de Seguretat (Eq. 36) que de la següent forma:

$$F = \frac{\sum \{ [c'x + (W - U \cos \alpha) \tan \varphi] M(\alpha) \}}{\sum (W \sin \alpha)} \quad (\text{Eq. 39})$$

On

$$M(\alpha) = \frac{1}{\cos \alpha \left[1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi'}{F} \right]} \quad (\text{Eq. 40})$$

S'arriba a la solució partint d'un F hipotètic, habitualment si el talús es manté estable es considera equilibri límit ($F=1$) i es va iterant fins que el mètode convergeixi. Una de les limitacions d'aquest mètode és que no assegura l'equilibri de forces horitzontals.

3.1.3 Mètode simplificat de Janbu

Janbu Simplificat (1957) és un mètode d'anàlisi de trencament de superfícies no circulars, que són habituals que es produeixin en capes de materials tous i heterogenis. Mentre que les superfícies de trencament circular es poden mobilitzar sense distració interna, les no-circulars han de considerar les tensions de tall internes. En cas contrari, s'obtenen factors de seguretat menors dels reals.

Partim de,

$$F = \frac{\text{Forces disponibles}}{\text{Forces necessàries per l'equilibri}}$$

Aplicació d'equilibri global de moments

$$F = \frac{\frac{\sum s \cdot l}{\cos \alpha}}{\sum W \cdot \tan \alpha} \quad (\text{Eq. 41})$$

Per tenir en compte les forces internes entre seccions s'utilitza un factor gairebé empíric de correcció f_0 definit per Janbu. Aquest factor és >1 i varia entre 1 i 1.13.

$$F = f_0 \frac{\frac{\sum s \cdot l}{\cos \alpha}}{\sum W \cdot \tan \alpha} \quad (\text{Eq. 42})$$

Considerant les seccions d'igual gruix,

$$F = f_0 \frac{\sum \{[c' + (W - U) \tan \varphi'] / n(\alpha)\}}{\sum (W \tan \alpha)} \quad (\text{Eq. 43})$$

on

$$n(\alpha) = \cos^2 \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \varphi}{F} \right) \quad (\text{Eq. 44})$$

3.2 ELEMENTS FINITS

El mètode dels elements finits és un mètode de càlcul utilitzat en els problemes de enginyeria. Es basa en considerar un cos o estructura i dividir-lo en elements amb determinades condicions que es relacionen entre sí, generant un sistema d'equacions que es resol numèricament i ens proporciona l'estat de tensions i deformacions. També s'utilitza en el camp de les matemàtiques com un mètode aproximat per resoldre equacions diferencials de forma numèrica.

La base del mètode dels elements finits és la representació d'un cos per un conjunt de divisions anomenades elements. Els nodes són els elements que connecten aquests elements, que seran punts en el cas unidimensional, línies per a un cas bidimensional i superfícies per a un cas tridimensional.

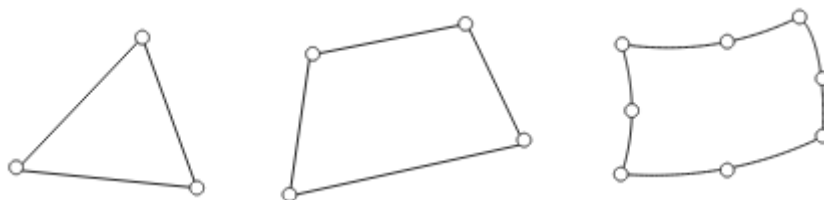


Figura 10 Elements que caracteritzen la malla2D

Una manera que tenim per discretitzar un cos o estructura és dividir-la en un sistema equivalent de cossos més petits, de tal manera que el conjunt representi el cos original. La solució que anem obtenint de cada unitat es combinen per obtenir una solució total. La solució del problema consisteix en trobar els desplaçaments d'aquests nodes i a partir d'aquests trobarem les deformacions i tensions dels sistema. Les propietats dels elements que uneixen els nodes estan caracteritzades pel material que defineix el grau de rigidesa i la geometria de l'estructura.

En la següent figura podem observar el procés d'anàlisi dels elements finits:

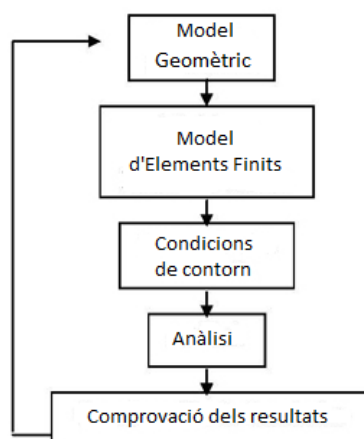


Figura 11 Passos d'anàlisi dels elements finits.

En el primer pas, és crea el model matemàtic de l'objecte o del conjunt a estudiar. En el modelat d'elements finits, dividim la geometria del model en petits elements volumètrics i s'assignen les propietats del material i de l'element. Després, es defineixen les condicions de contorn per simular el cas el més real possible. Un cop fet, s'executen els resultats, tant les tensions com les deformacions. Finalment es comparen els resultats amb el criteri que ens exigeix el disseny, en cas de que no es complís repetiríem el procés.

Finalment, explicarem les equacions d'equilibri d'aquest mètode. L'equació d'equilibri obtinguda per un element pot aplicar-se a tots i cada un dels elements en que s'ha dividit el sistema continu. D'aquesta manera es garanteix l'equilibri de tots ells individualment, tenint en compte, en aquestes equacions, les forces de connexió entre els elements.

Per obtenir l'equació d'equilibri de tota l'estructura és necessari imposar l'equilibri a les fronteres d'unió entre els elements. En aquestes fronteres s'introdueixen les forces de connexió entre elements q_c , que a la vegada donen lloc a les forces dels nodes equivalents corresponents P_c . Si considerem l'equilibri de les fronteres equivalents, també ho estarem fent de l'equilibri dels nodes d'unió entre elements.

Si es planteja conjuntament les equacions d'equilibri de tots els nodes d'unió entre tots els elements, s'obté un conjunt d'equacions que representa l'equilibri de tota l'estructura. Aquestes equacions s'obtenen per la unió de les equacions d'equilibri dels diferents elements finits que la formen, en la següent forma:

$$\bigcup_e K^e \delta^e = \bigcup_e [P_v^e + P_s^e + P_T^e + P_b^e + P_N^e] + \bigcup_e P_c^e \quad (Eq. 45)$$

Hem utilitzat el símbol \bigcup per indicar la unió de les diferents magnituds segons els graus de llibertat de l'estructura. En aquest procés d'unió es cancel·len totes les forces de connexió entre els elements que estan en contacte, doncs es tracten de forces iguals però de signe diferent:

$$\bigcup_e P_c^e = 0 \quad (Eq. 46)$$

Els components són:

- P_e és el vector de forces exteriors actuant sobre els nodes d'unió dels elements.
- P_v, P_s, P_T, P_b són els vectors de forces nodals equivalents produïdes per les forces de volum, de superfície, deformacions inicials i de les tensions inicials. Si partim d'una estructura que ja està en equilibri el vector P_b és nul.

4 ANÀLISIS DELS MODELS

4.1 INTRODUCCIÓ

Aquest quart capítol conté la part pràctica de l'estudi. Després de definir els conceptes bàsics en els capítols anteriors, només queda aplicar-los. Els conceptes tractats anteriorment són les variables en els diferents casos que ara s'aplicaran. Les variables amb els quals es treballa són angles de fricció, cohesió i pes específic.

4.2 DESCRIPCIÓ DELS PROGRAMES

En aquest apartat es fa una breu explicació dels dos programes situant-los en el context històric en el qual es van crear cadascun. El programa PLAXIS és més modern i conté un programari més extens i amb moltes més possibilitats, del qual podem obtenir deformacions del talús, variacions de les tensions. El programa GEO-SLOPE és més senzill i té menys opcions alhora de fer un estudi d'estabilitat i només ens deixa obtenir la superfície de trencament més inestable amb el seu corresponent factor de seguretat.

4.2.1 GEO-SLOPE



Avui en dia, els anàlisis d'estabilitat són el tipus més comú d'anàlisi numèrica en enginyeria geotècnica. Això és significatiu perquè es tracta d'una qüestió clau a l'hora de plantejar-se qualsevol projecte. El software de l'estabilitat de talussos es va convertir en una eina disponible poc després de l'arribada dels ordinadors. El programari modern de l'equilibri límit està fent possible que cada cop més es tractin problemes amb una gran dificultat com una estratigrafia complexa, una pressió de l'aigua de porus molt irregular, diversos models de resistència al tall lineals i no lineals, gairebé qualsevol tipus de forma de la superfície de trencament, càrregues concentrades i reforços estructurals. El software també fa possible entendre millor el mètode d'equilibri límit. El programa dona una visualització gràfica de les dades utilitzades en els càlculs i permet obtenir més resultats a part del factor de seguretat. Per exemple, la visualització de la distribució d'una varietat de paràmetres al llarg de la superfície de trencament, ajuda en gran mesura a entendre els detalls de la tècnica utilitzada. També ha portat a una major comprensió dels diferents mètodes disponibles, Bishop, Janbu i Spencer entre altres.

SLOPE/W, d'una manera o una altra ha estat al mercat des de 1977. El codi inicial va ser desenvolupat pel professor D.G.Fredlund a la Universitat de Saskatchewan, Canada. La primera versió comercial es va instal·lar a ordinadors centrals i els usuaris podien accedir al programari

a través d'agències de programari. Després, en la dècada de 1980, quan els ordinadors particulars van arribar a estar disponibles, el codi va ser reescrit per complet. El temps d'execució era relativament baix però la memòria dels ordinadors era massa escassa i per tant es va haver de reestructurar el codi per l'entorn d'aquest hardware. L'any 1983 el producte va ser anomenat com PC-SLOPE. Més tard es va veure que s'havia de desenvolupar un software per poder interaccionar la gràfica amb el programari PC i va ser rebatejat de nou com SLOPE/W. Així doncs, SLOPE/W era el primer producte amb software geotècnic disponible al mercat per a l'anàlisi d'estabilitat de talussos.

El programa GEO-SLOPE té un funcionament simple, ja que un cop introduït el model amb el qual volem treballar i que en els nostres casos és Mohr-Coulomb, aquest programa només té 3 opcions d'inputs que són la cohesió, l'angle de fricció i el pes específic. Ens quedarà només definir amb quin mètode és vol resoldre el cas. Treballarem amb Spencer, Bishop i Janbu respectivament en els nostres casos. En la següent figura podem veure com s'introdueixen aquestes variables.

4.2.2 PLAXIS 2D AE



PLAXIS 2D AE és un programa d'elements finits de dos dimensions, desenvolupat per l'anàlisi de la deformació, l'estabilitat i el flux de l'aigua subterrània en l'enginyeria geotècnica. PLAXIS ofereix una gran gamma de productes relacionats amb programes d'elements finits i que s'utilitzen a tot el món per enginyeria o per disseny geotècnic. El desenvolupament de PLAXIS va començar el 1987 a la Universitat Tecnològica de Delft com una iniciativa del Ministeri holandès d'Obres i Aigua Pública de Gestió (Rijkswaterstaat). En els següents anys, PLAXIS es va ampliar per tal de cobrir les altres àrees d'enginyeria geotècnica. Com que les activitats estaven en un continu creixement l'empresa PLAXIS (Plaxis bv) es va crear l'any 1993.

L'any 1998, la primera versió de PLAXIS 2D va ser llançada per Windows, mentre que els càlculs per resoldre problemes d'element finits en 3D es va desenvolupar i va sortir en format programa anomenat 3DTunnel l'any 2001. El segon programa de 3D s'anomenava 3DFoundation que va ser llançat al mercat l'any 2004. No obstant, ni en 3DTunnel ni en 3DFoundation és possible definir unes geometries arbitràries a causa de les seves limitacions. Finalment l'any 2010 el programa PLAXIS 3D va treure una versió on es podia treballar de manera tridimensional completa i que combinava una interfície fàcil d'usar amb instal·lacions completes de modelatge.

4.3 CAS 1: VARIACIÓ DE LA COTA DE LA LÀMINA D'AIGUA

Aquest primer cas d'estudi fa referència a quan un talús està sotmès a un volum d'aigua i la cota de la làmina d'aigua va variant. És considera un cas interessant ja que per exemple, molt pobles i ciutats estan situats a prop de les lleres dels rius i és interessant saber com li afecta a un talús un canvi del cabal del riu. El nostre estudi s'ha realitzat a 5 cotes de la làmina d'aigua. L'alçada de les cotes d'aigua $[H_w]$ seran de 10, 8, 5, 2 i 0 metres. El talús que hem definit per aquest cas té una alçada de $H = 10 \text{ metres}$ per tant les cotes d'aigua seran des de que el talús suporta el 100% de capacitat fins el 0% de capacitat. El model constitutiu que hem definit per aquest cas en els dos programes és Mohr-Coulomb. Com que estem realitzant un estudi comparatiu necessitem molts casos per avaluar com de sensibles són els programes amb canvis de cohesió o d'angle de fricció. Per tant proposem quatre valors d'angle de fricció: 12,20,30,i 40°. Per calcular els diversos valors de cohesions s'ha volgut que depenguessin dels valors de pes específic no saturat i de l'alçada que tingues el talús i amb un coeficient α el qual ha pres tres valors: 0,10, 0,15 i 0,20. Si definim $\gamma_{unsat} = 18 \text{ KN/m}^2$ ja podem calcular els valors de cohesió.

$$c = H \cdot \alpha \cdot \gamma_{unsat} \quad \text{Eq. 47}$$

Per tant tenim tres valors de cohesió que hem calculat mitjançant l'equació Eq. 47 i que apareix a la Taula 2. Que si els combinem amb cada una de les cotes d'aigua i cada angle de fricció ens surten fins a 60 casos d'estudi per cadascun dels programes.

Taula 2 valors de cohesió per el material

α	Cohesió [kpa]
0,1	18
0,15	27
0,2	36

La geometria per aquest cas i que s'ha introduït igual als dos programes està definit a la següent figura.

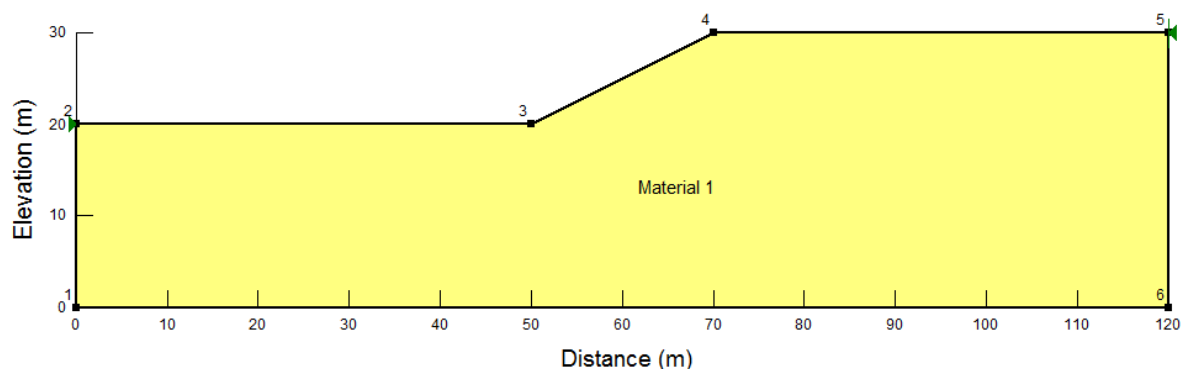


Figura 12 Geometria del talús corresponent al cas 1

4.3.1 GEO-SLOPE

El programa GEO-SLOPE, tal i com hem comentat, treballa amb el mètode d'equilibri límit. És per això que hem de definir quin és el tipus d'anàlisi amb el que volem que calculi el nostre factor de seguretat. Per aquest primer cas hem utilitzat el mètode de Spencer. A la següent figura podem observar com a part de definir el programa també ens deixa escollir com volem que sigui la direcció del moviment, així com escollir el rang d'entrada i sortida de la superfície de trencament.

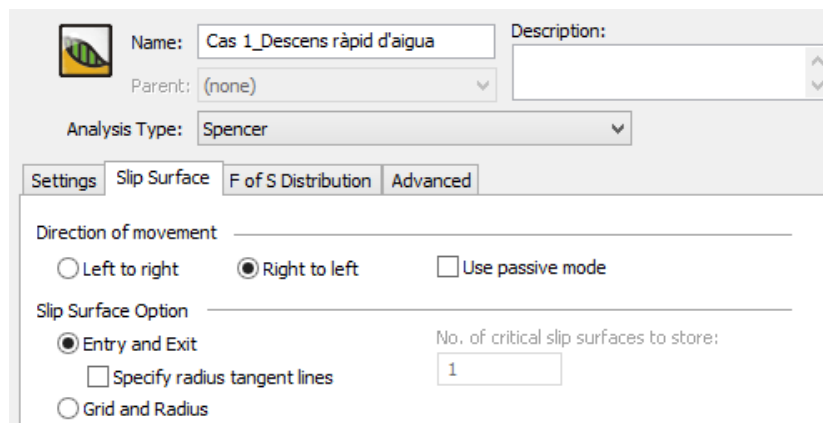


Figura 13 Finestra per definir propietats i el tipus d'anàlisi. Programa GEO-SLOPE.

4.3.2 PLAXIS 2D AE

En aquest primer cas, s'han definit tots els materials i l'estructura del talús, després hem hagut de crear una malla la qual es podem observar cadascun dels nodes i de com estan dividits en petits elements amb un volum determinat.

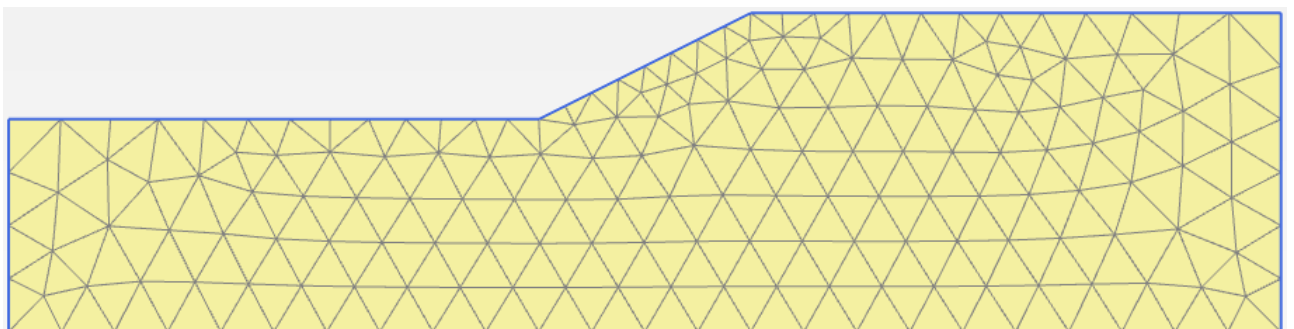


Figura 14. Malla que es crea per aquesta geometria. Programa PLAXIS

A la següent taula tenim tots aquells valors dels paràmetres que s'han introduït per aquest cas. Com podem observar, si per el programa GEO-SLOPE ens demanava tres inputs, el programa PLAXIS ens demana bastants més ja que com que també té en compte les deformacions a part de les variacions de tensions. Paràmetres com el mòdul de Young o el coeficient de Poisson en són un exemple.

Taula 3 Resum dels paràmetres introduïts per aquest cas 1

Parameter	Name	Material 1	Units
General			
Material model	Model	Mohr-Coulomb	-
Drainage type	Type	Drained	-
Soil unit weight above p.l	γ_{unsat}	18	KN/m^3
Soil unit weight below p.l	γ_{sat}	22	KN/m^3
Parameters			
Young's modulus	E'	50000	KN/m^2
Poisson ratio	ν'	0,25	-
Cohesion	c'	variable	KN/m^2
Friction angle	φ'	variable	º
Dilatancy angle	ψ'	-	º
Flow			
Horitzontal permeability	k_x	0,01	m/day
Vertical permeability	k_y	0,01	m/day

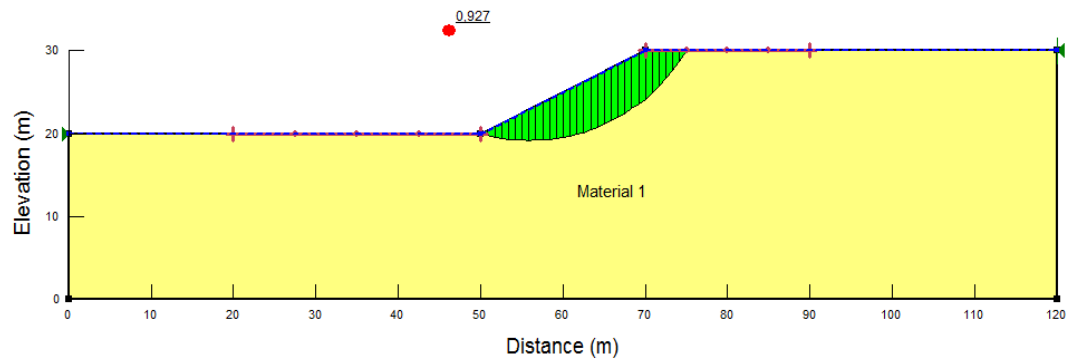
4.3.3 Anàlisi dels casos

En aquest apartat es mostren els resultat que s'han obtingut per cadascun dels casos. En el cas dels resultats del programa GEO-SLOPE és només una solució del possible mecanisme de trencament. Mentre que el PLAXIS ens dona més solucions ja que també ens calcula les deformacions, és per això que per cada cas tindrem dues figures, una de com s'ha deformat la malla que equivaldria a com es deforma el talús sota les condicions definides i una segona figura que ens mostra les deformacions de tall que equivalen al possible mecanisme de trencament. Per aquest primer cas s'han combinat tots els paràmetres que hem anat variant com la cota de la làmina d'aigua (0,2,5,8,10 metres), l'angle de fricció (12,20,30 i 40º) i la cohesió (18,27 i 36) han sortit fins a 120 casos.

4.3.3.1 $H_w = 0$ metres

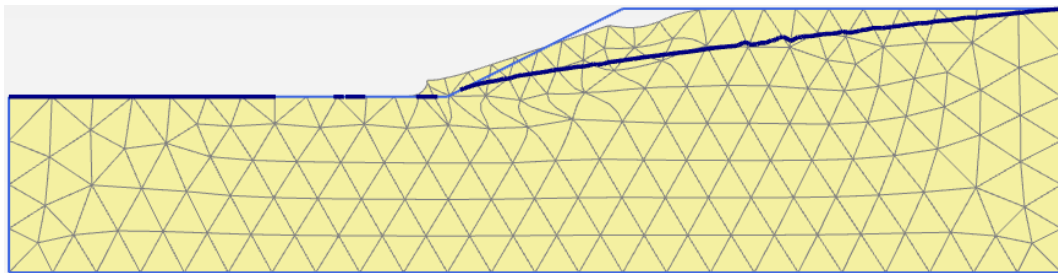
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18$ kPa
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

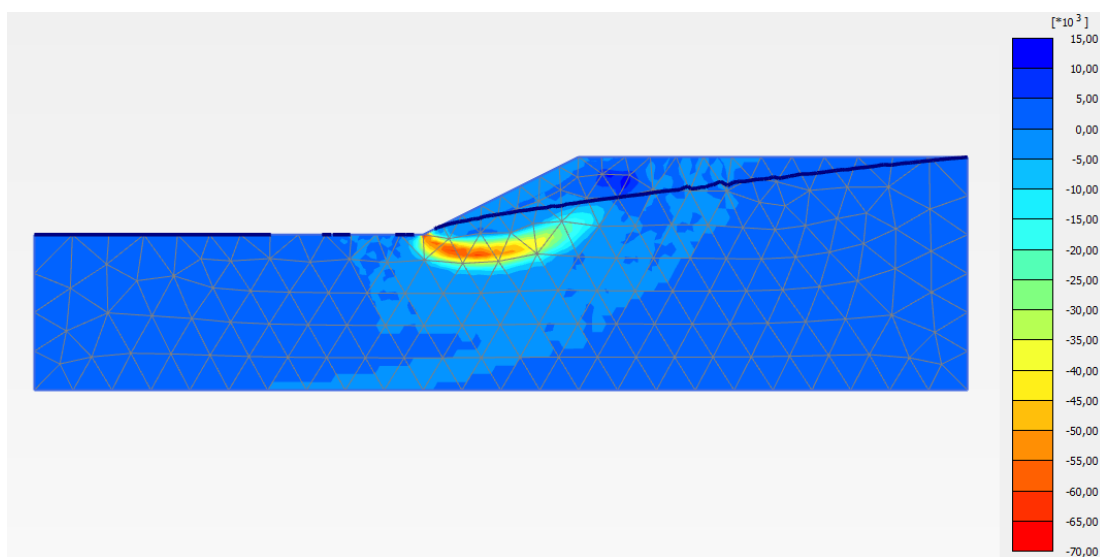
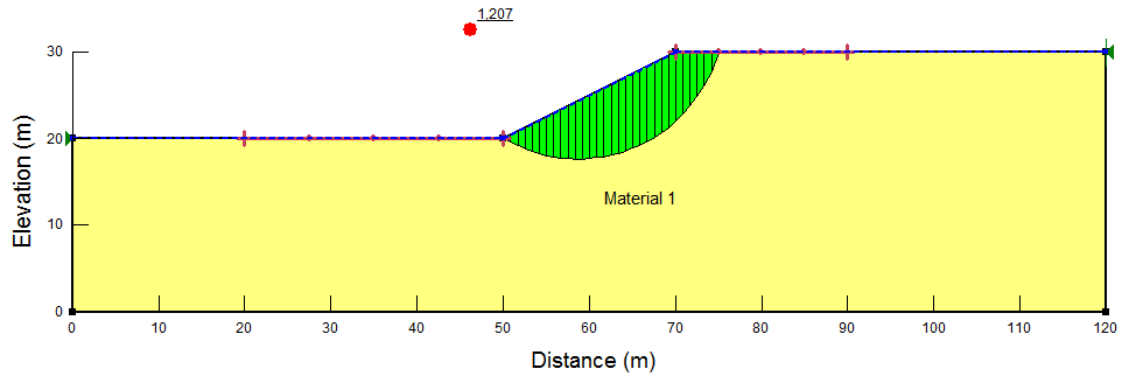


Figura 15 Cas 1. $H=0m$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

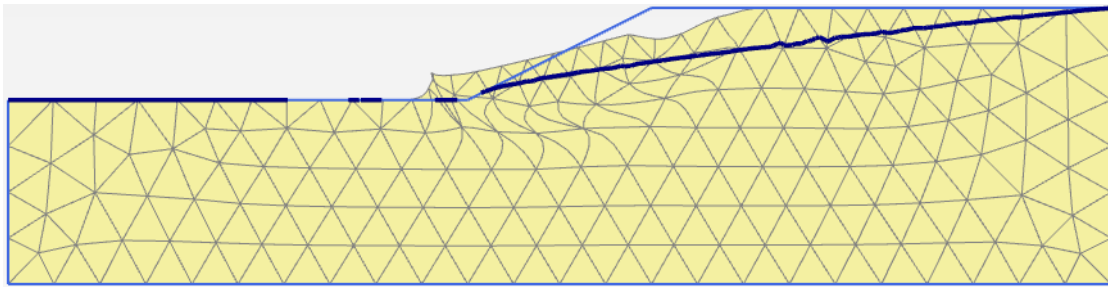
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

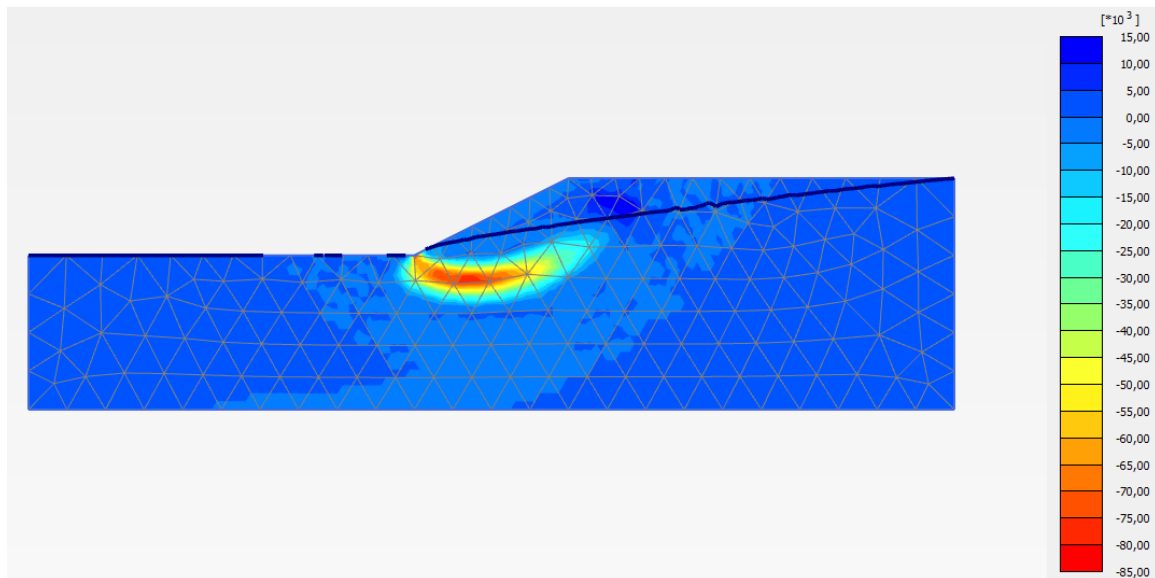
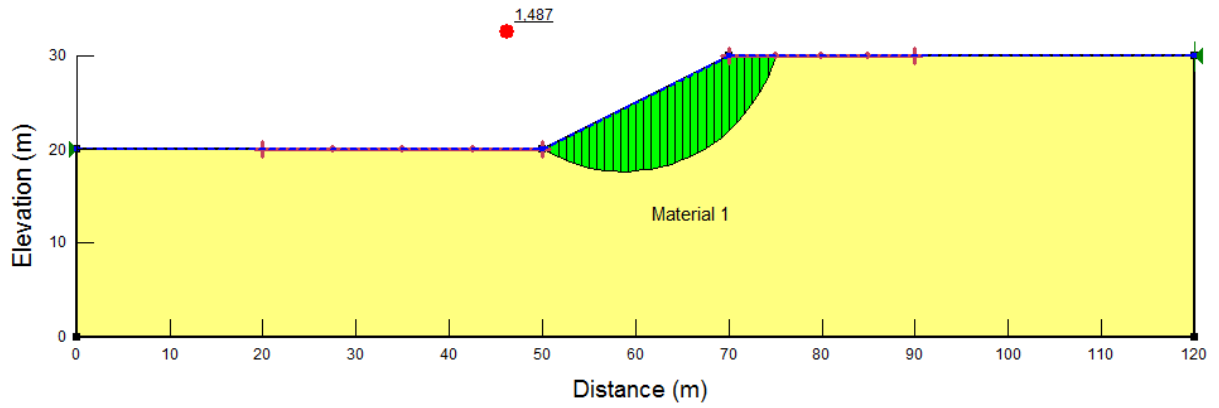


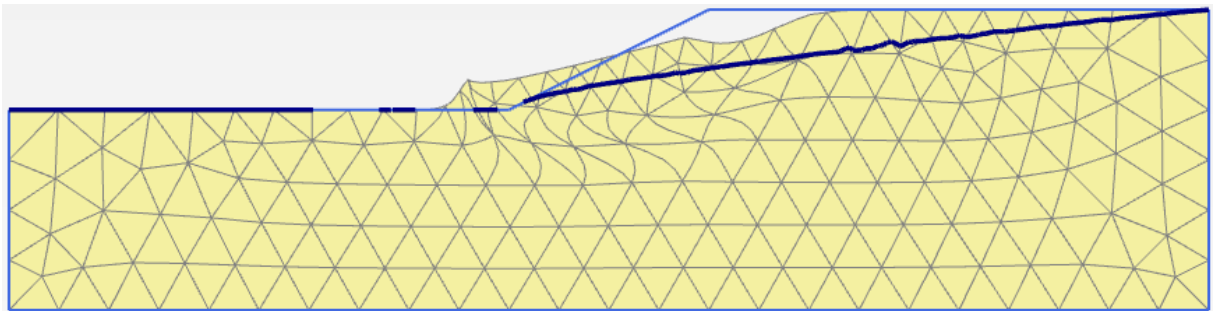
Figura 16 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



(b)



(c)

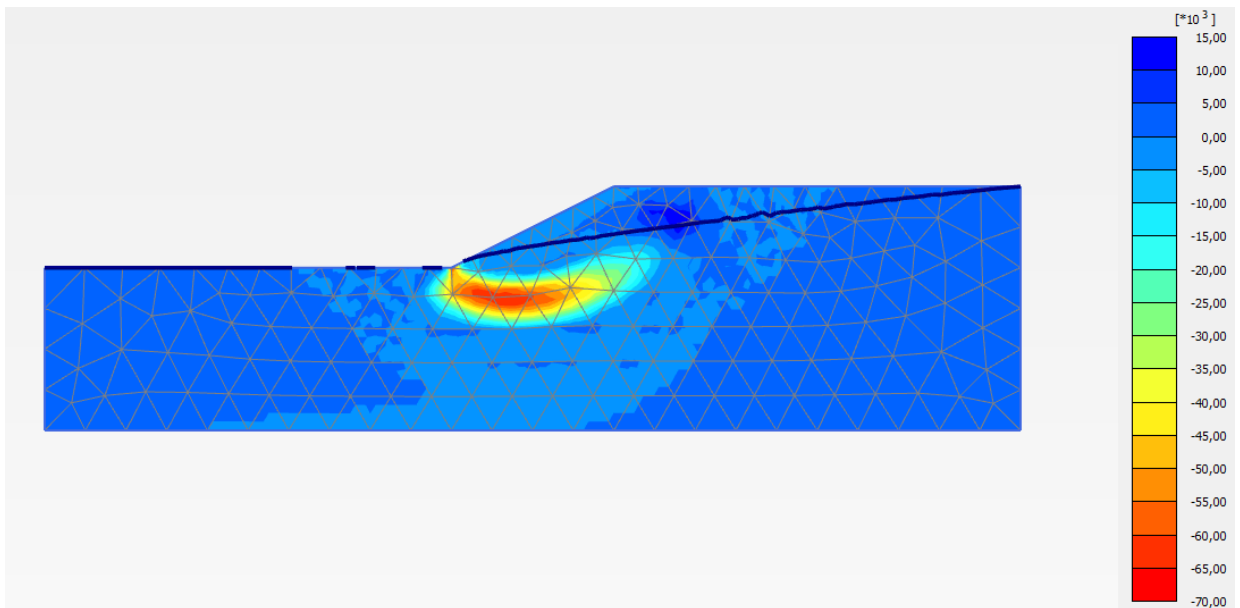
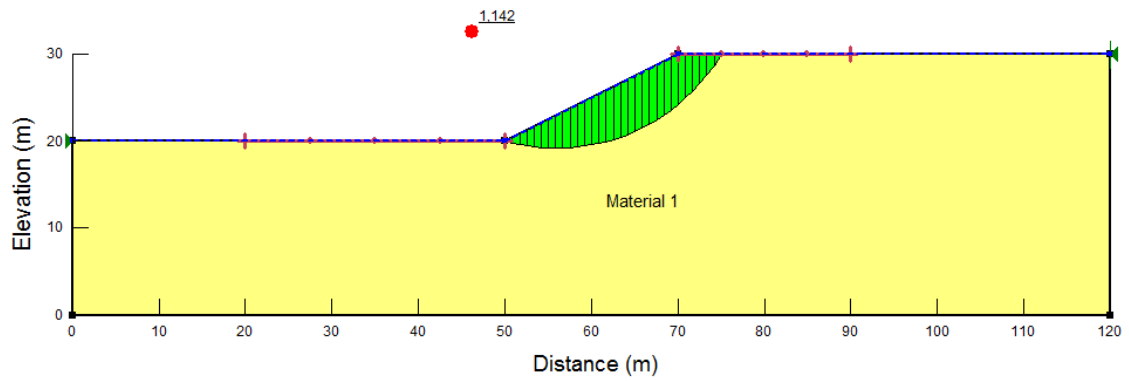


Figura 17 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

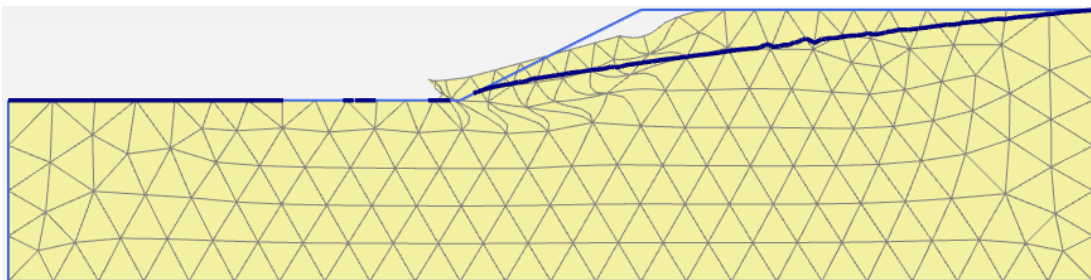
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

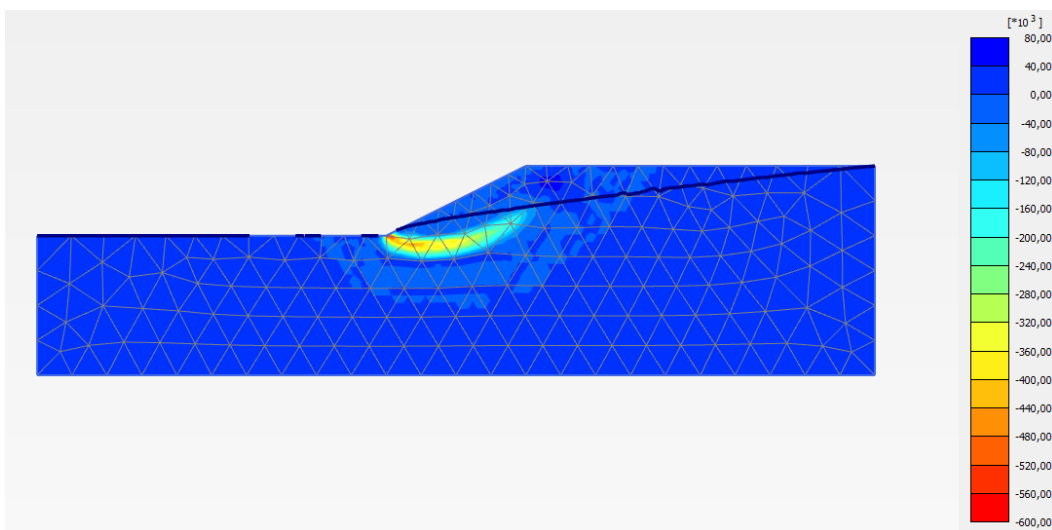
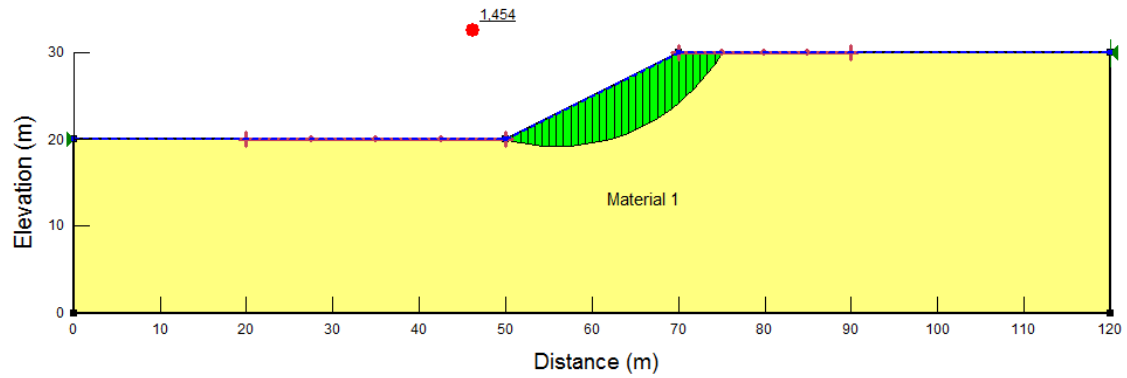


Figura 18 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

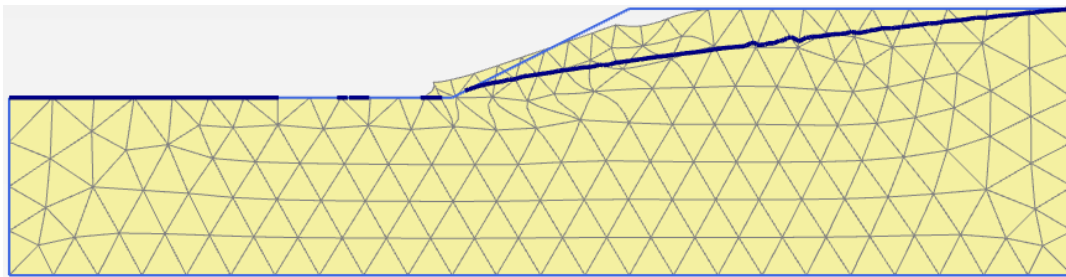
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

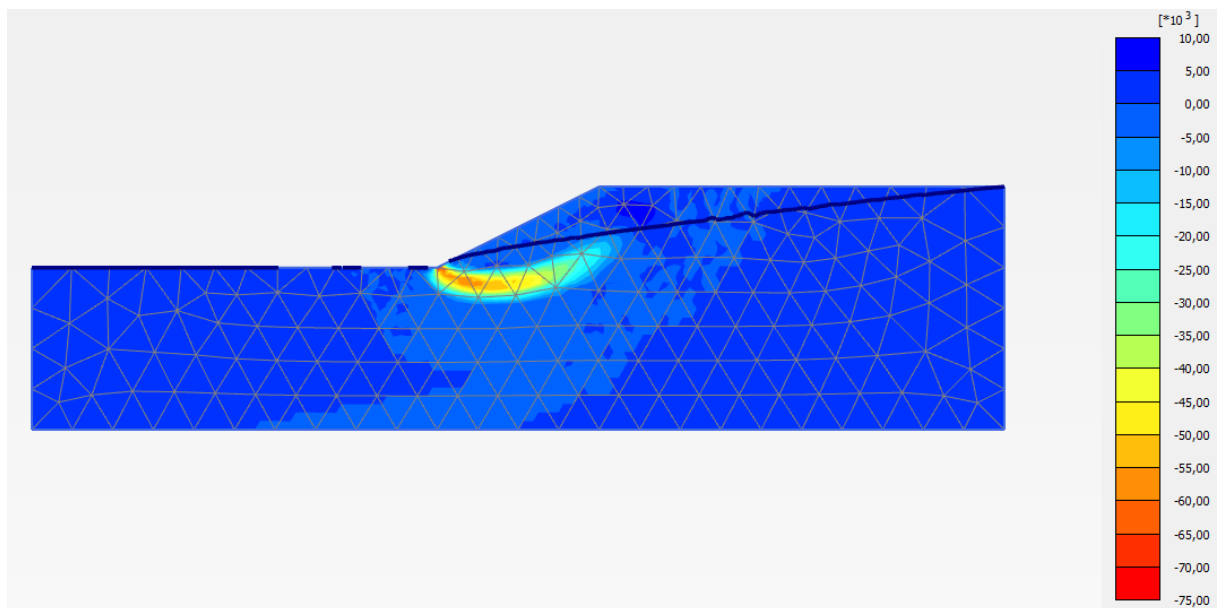
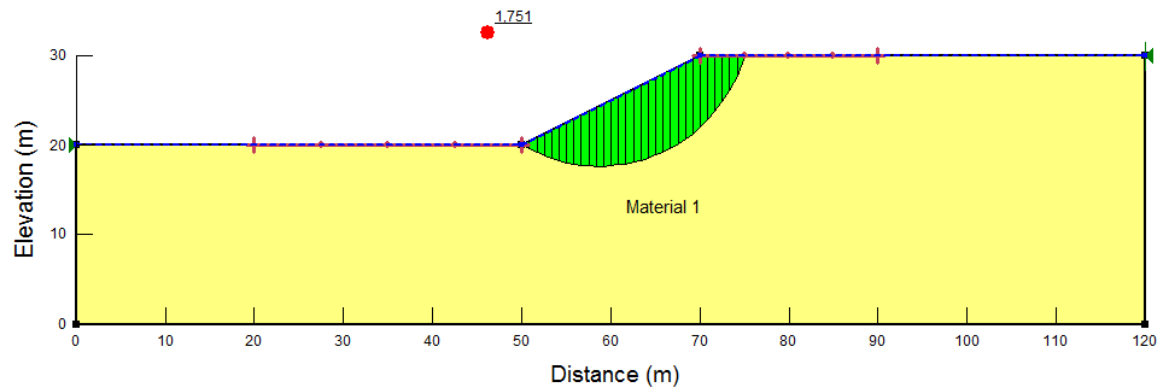


Figura 19 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

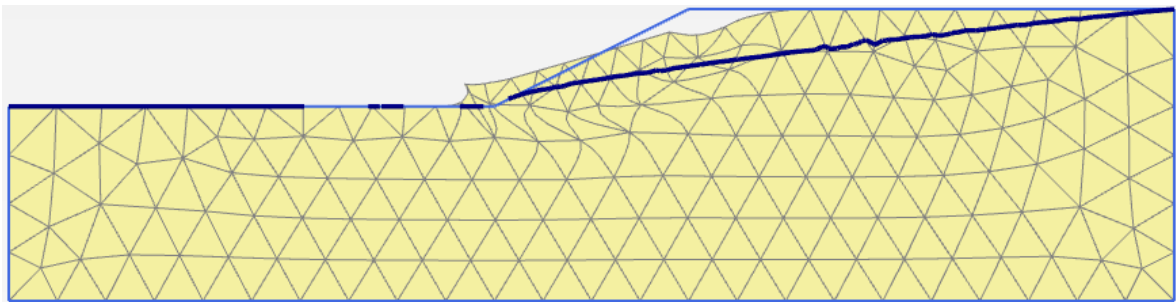
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

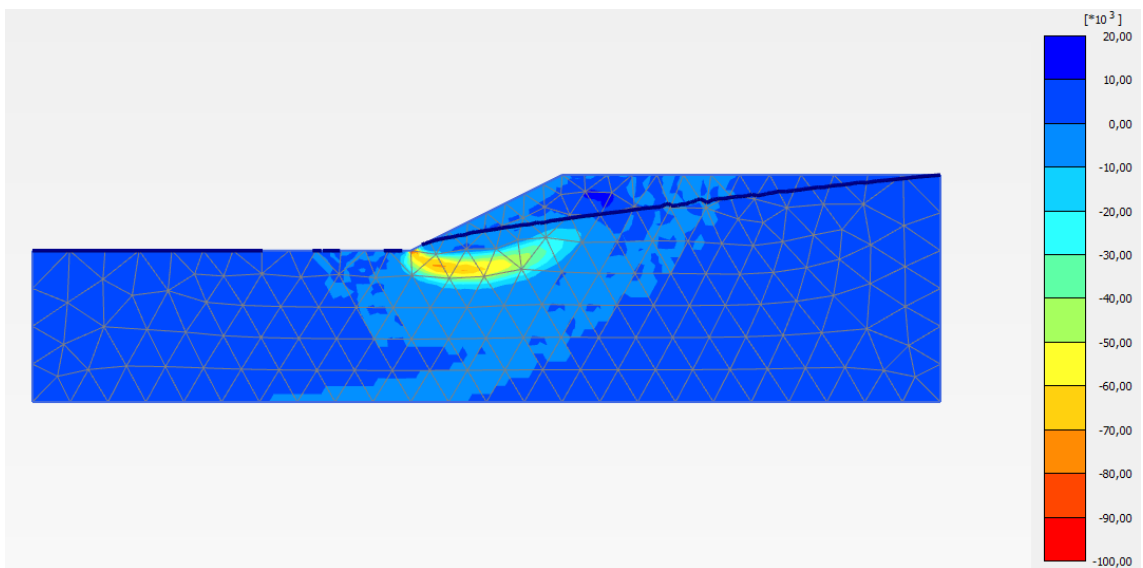
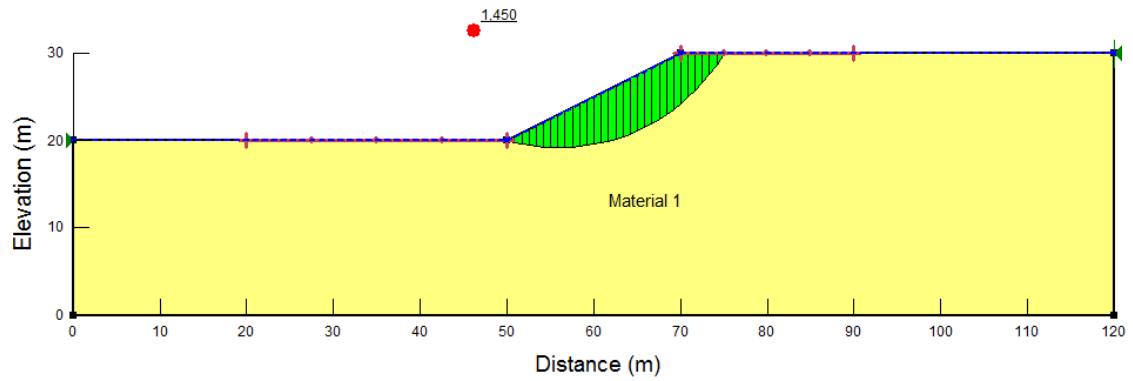


Figura 20 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

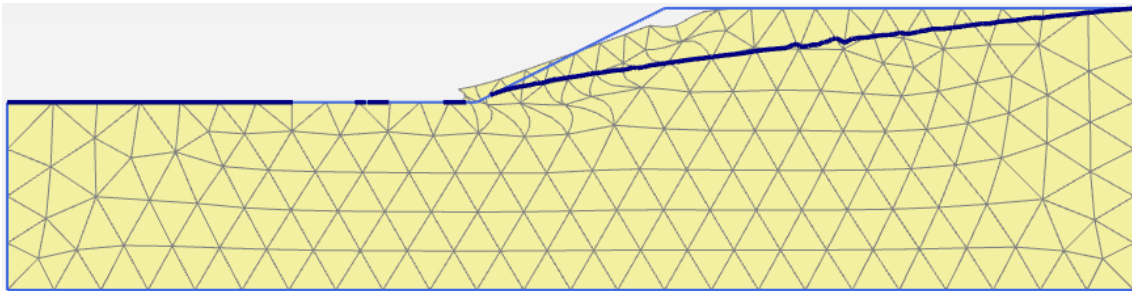
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

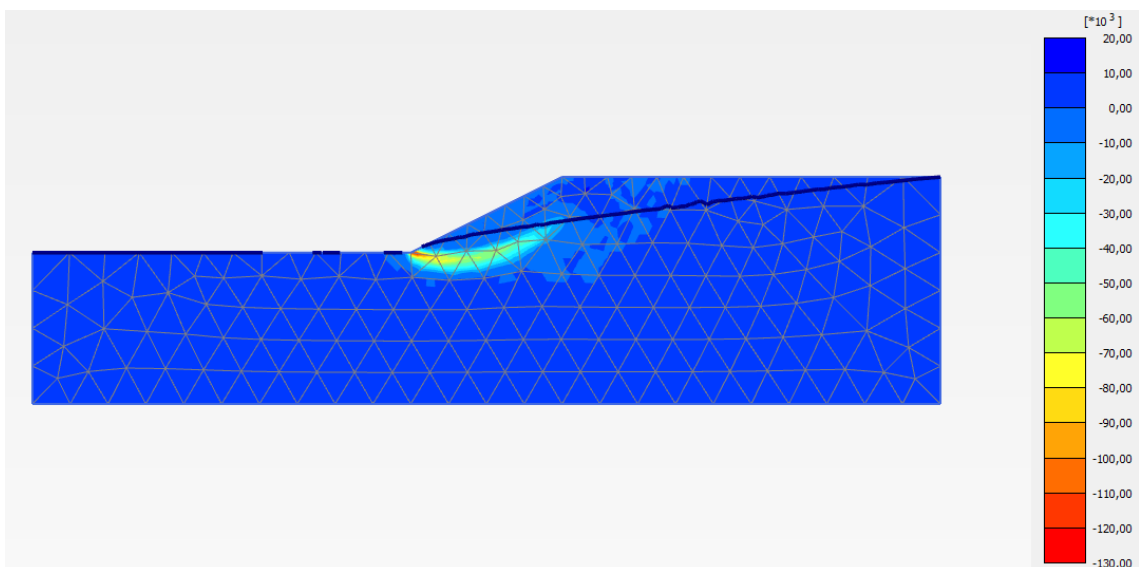
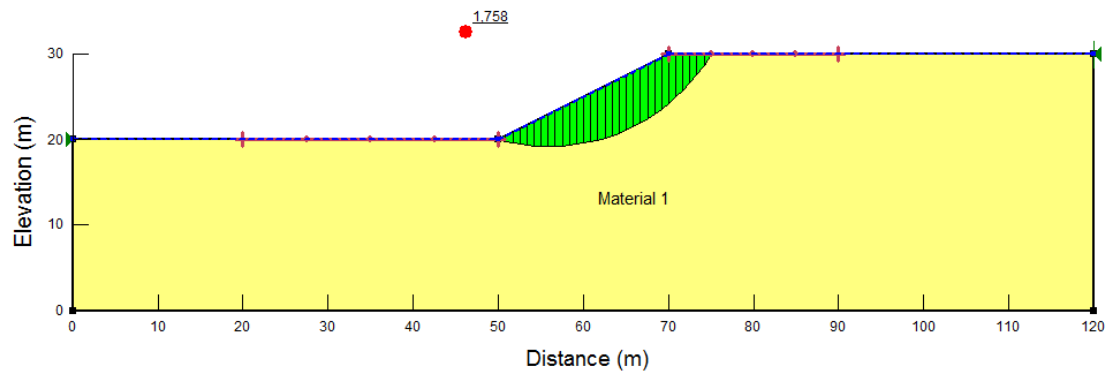


Figura 21 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

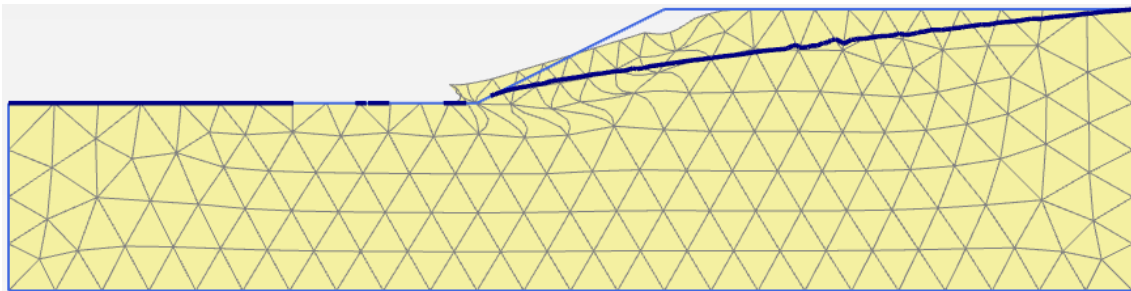
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

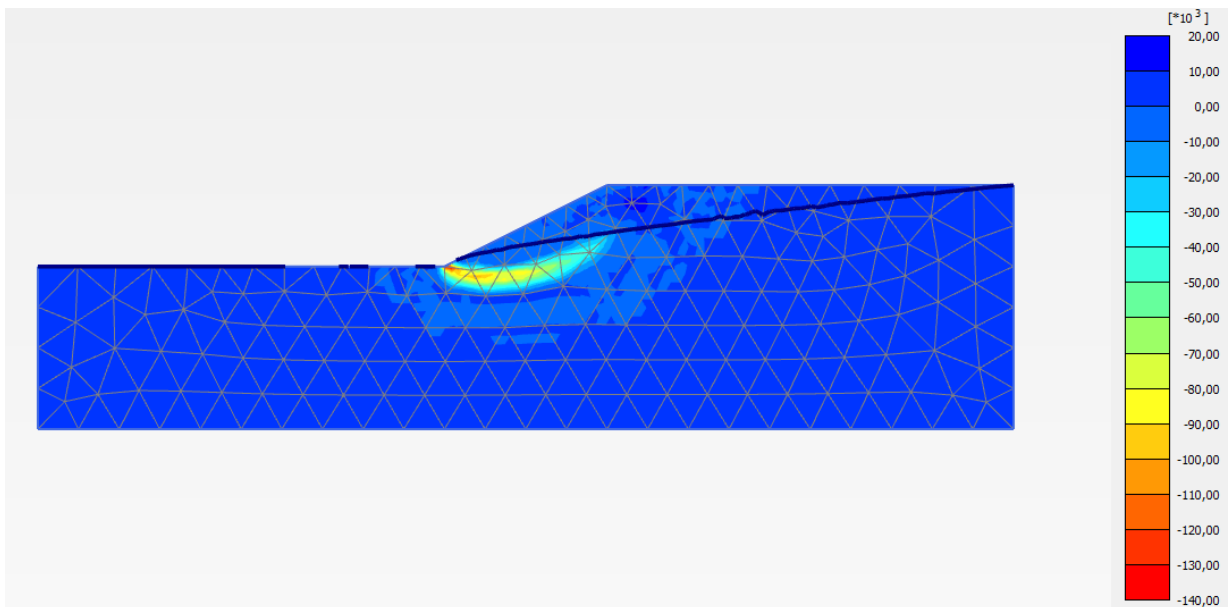
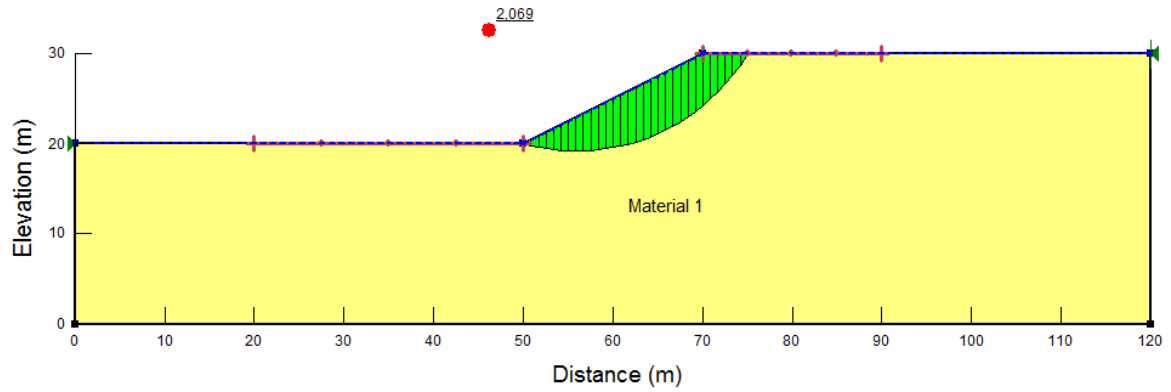


Figura 22 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

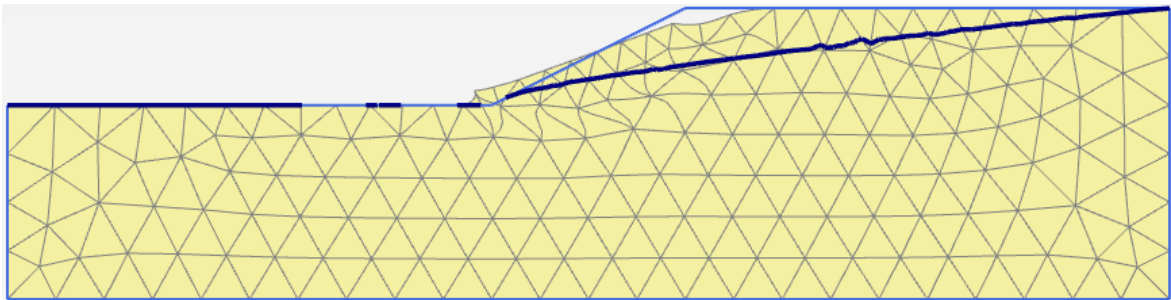
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

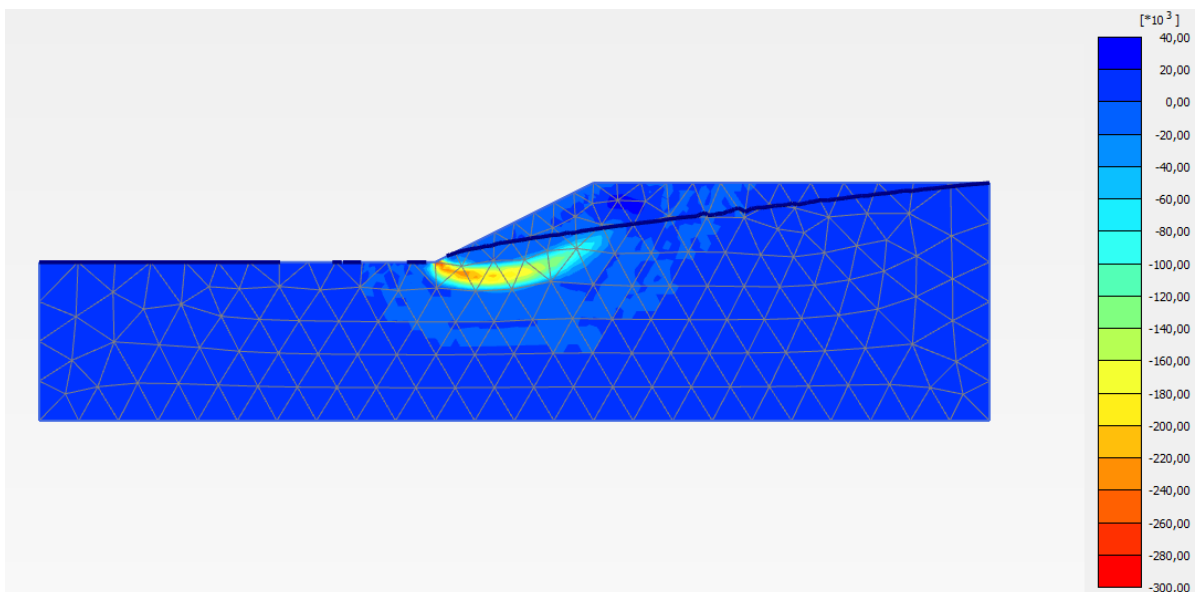
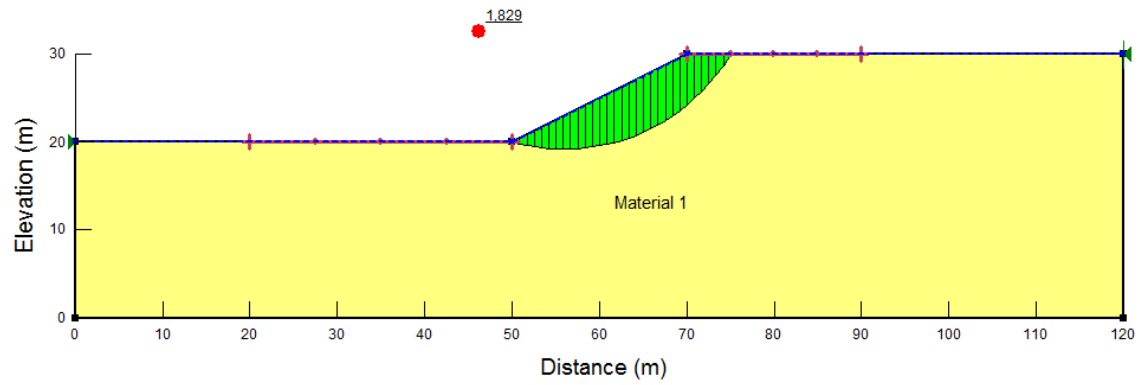


Figura 23 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

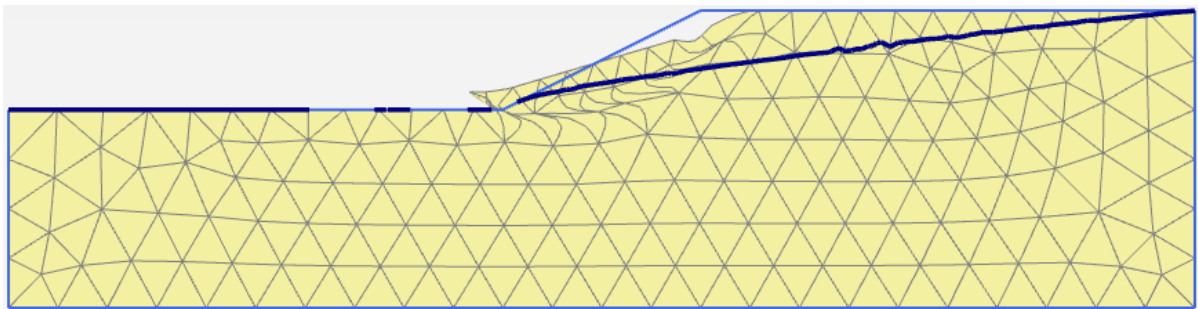
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

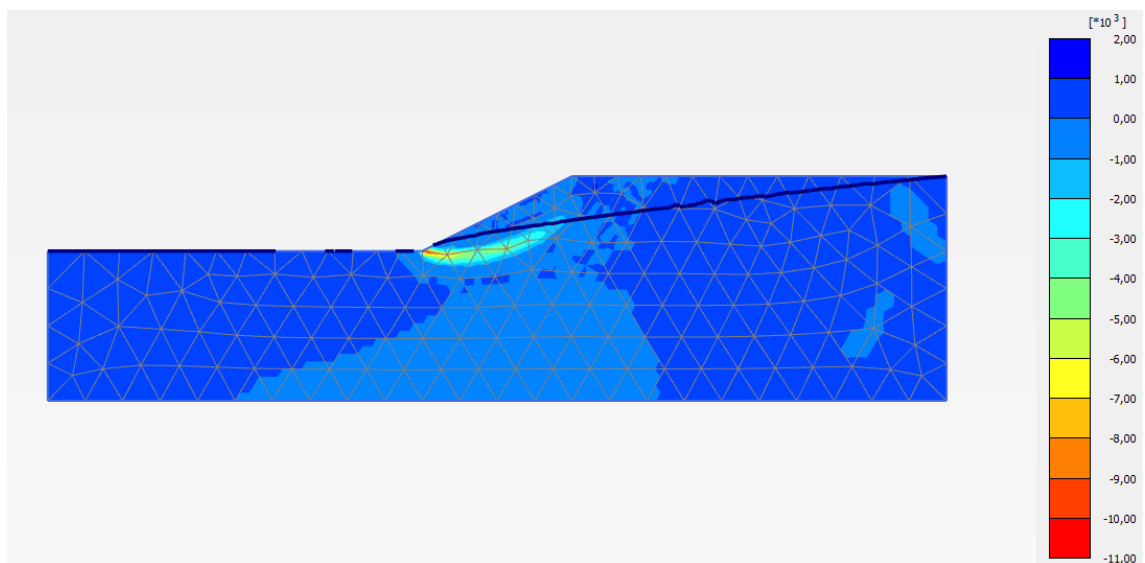
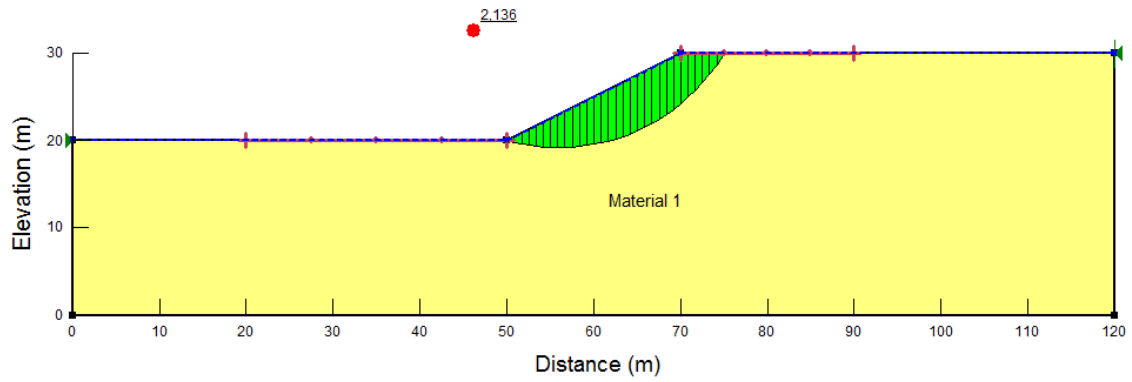


Figura 24 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

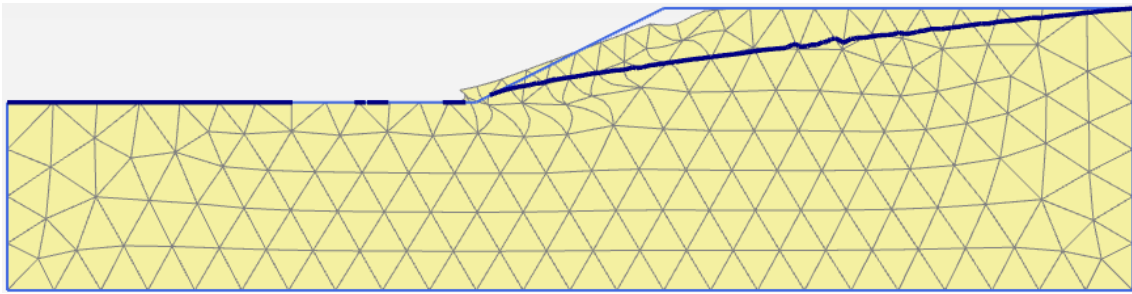
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

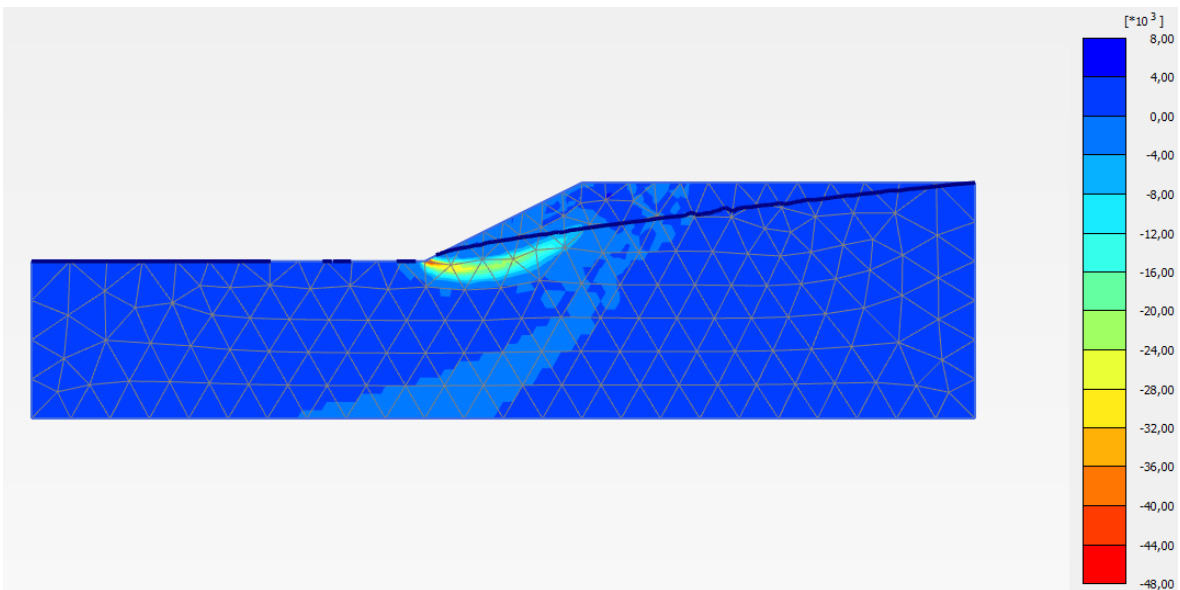
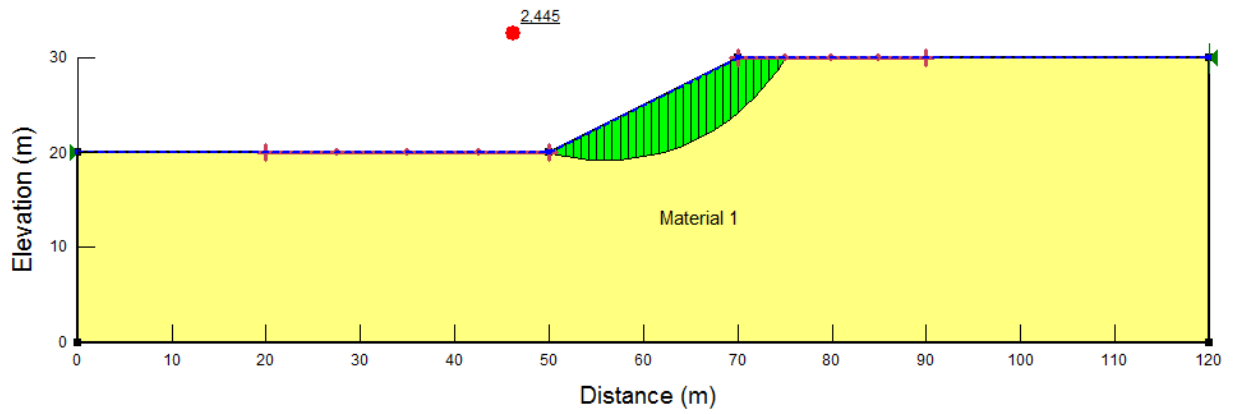


Figura 25 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

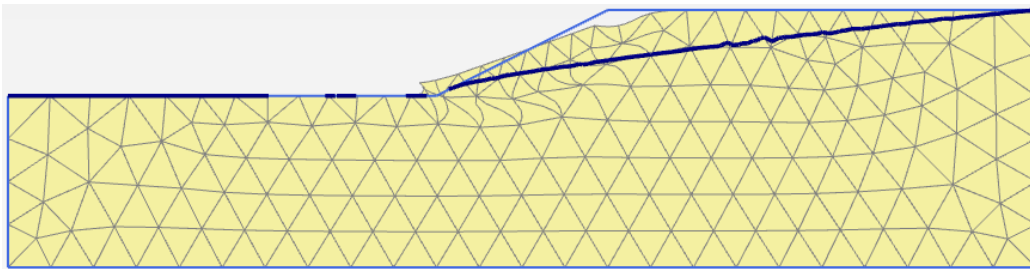
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

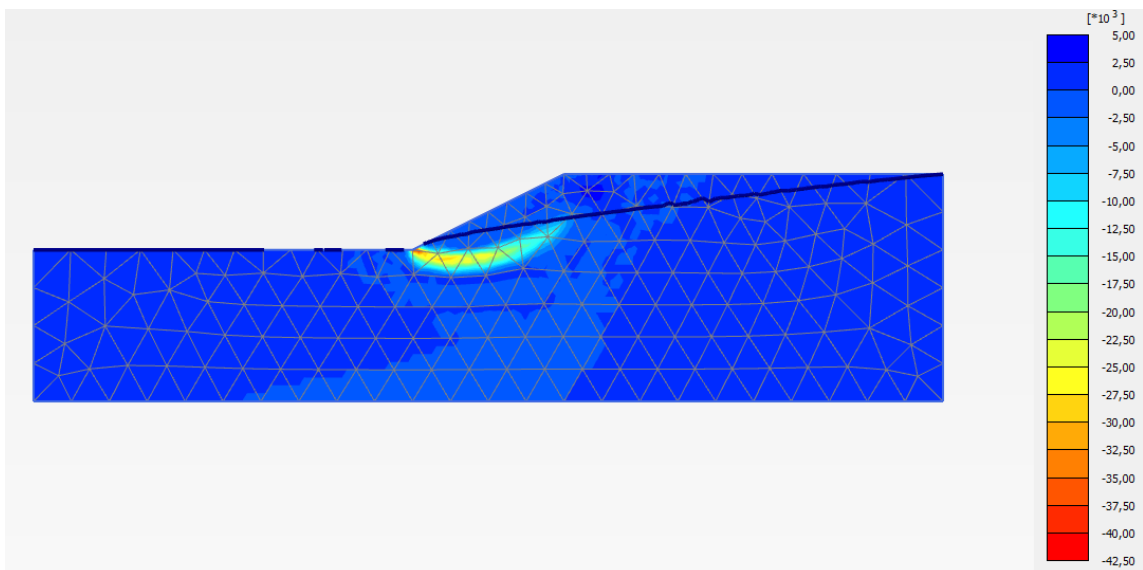
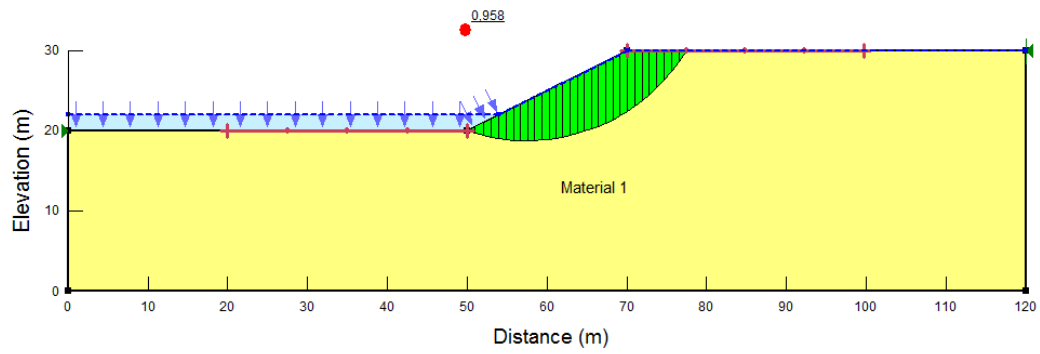


Figura 26 Cas 1. $H=0\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

4.3.3.2 $H_w=2$ metres

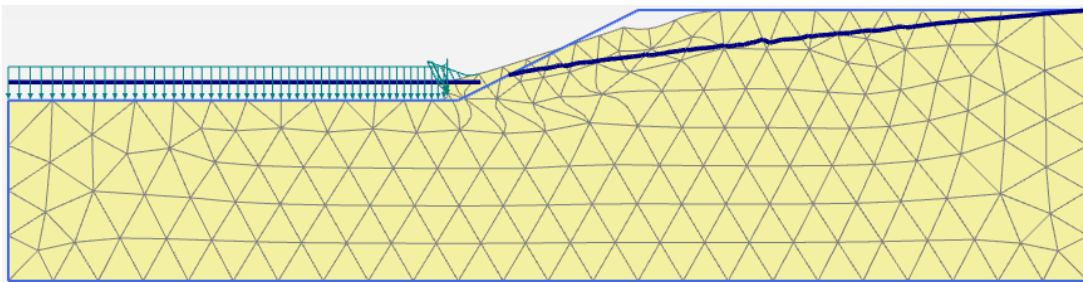
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18$ kPa
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

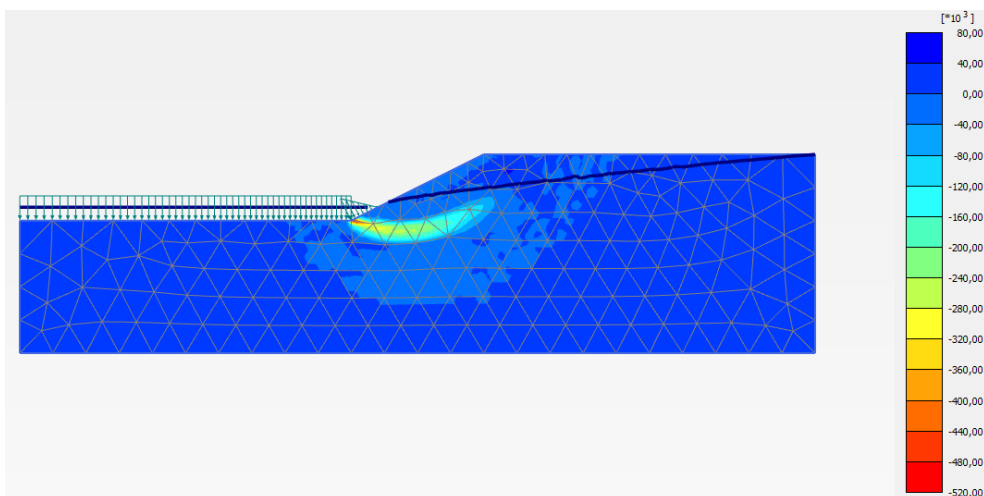
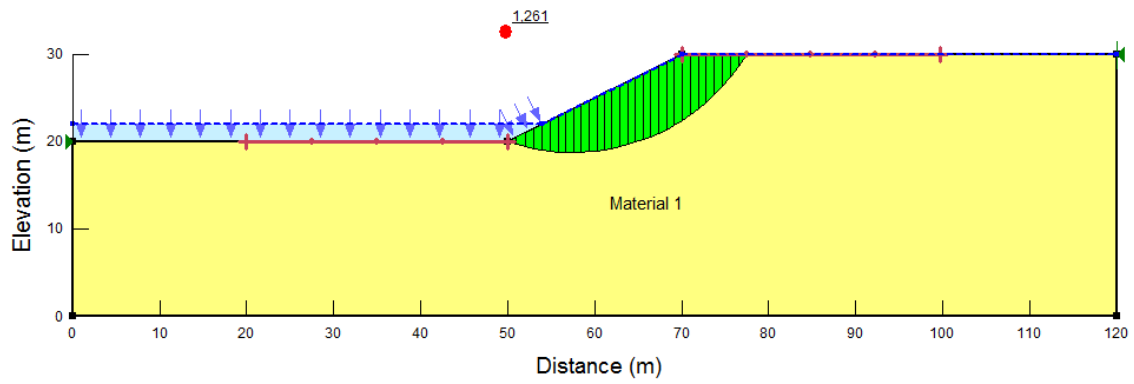


Figura 27 Cas 1. $H=2$ m, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

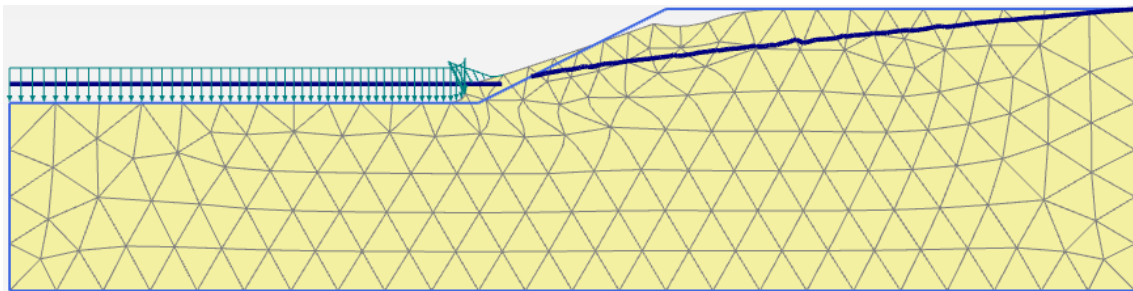
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

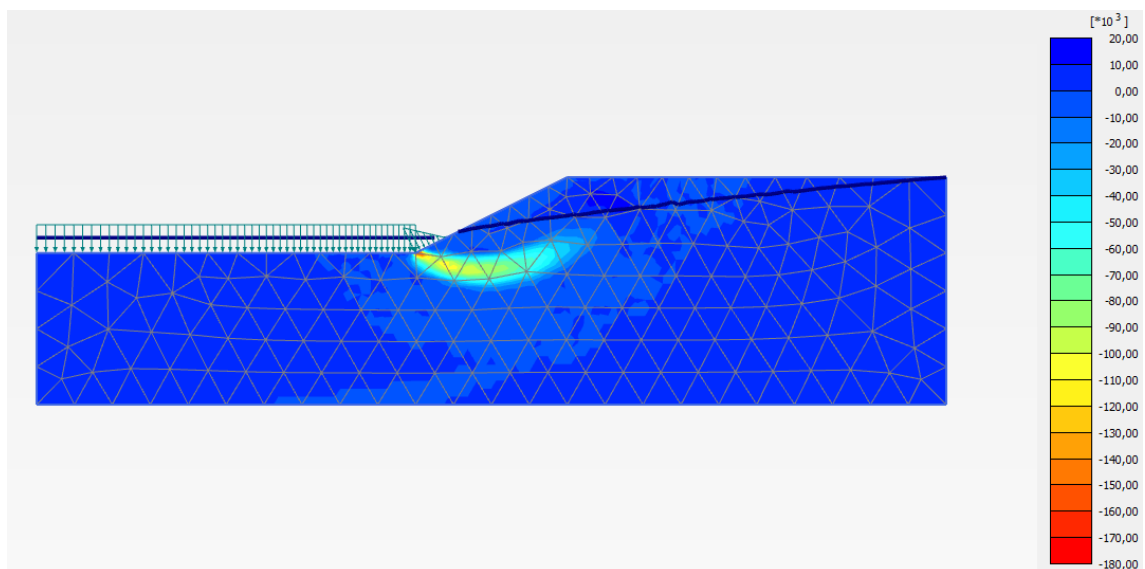
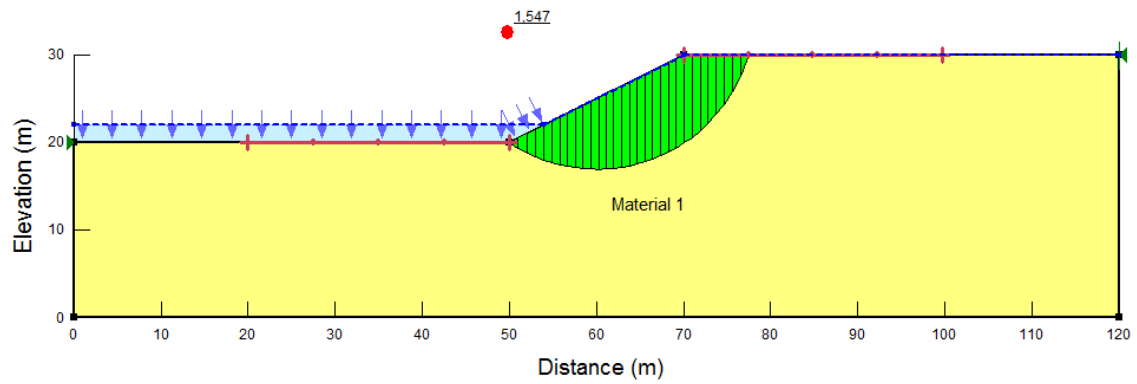


Figura 28 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

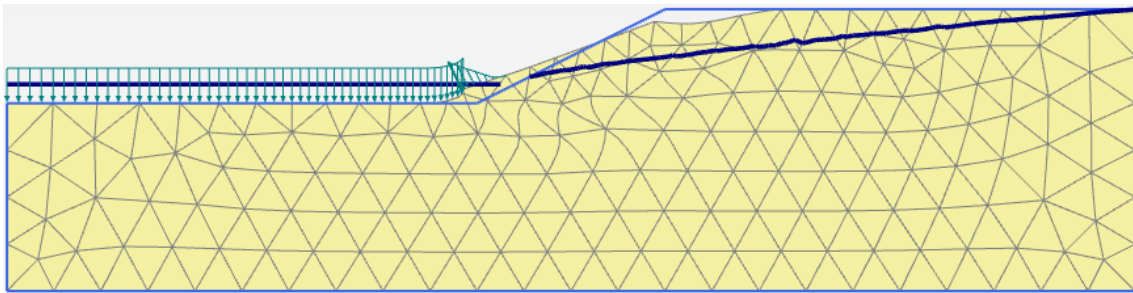
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

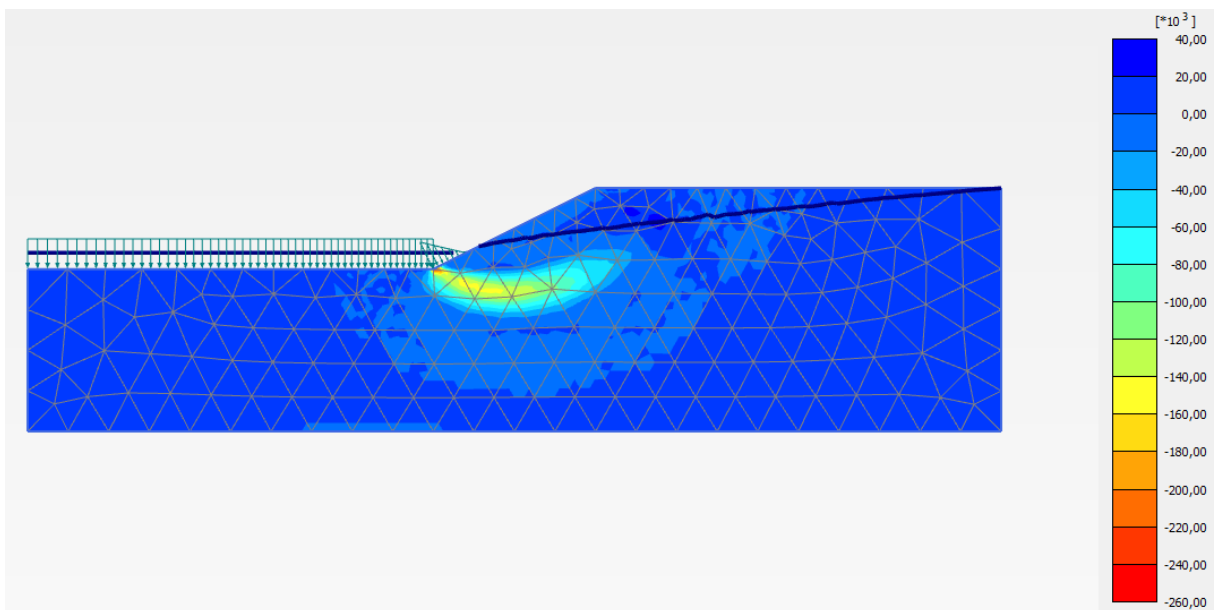
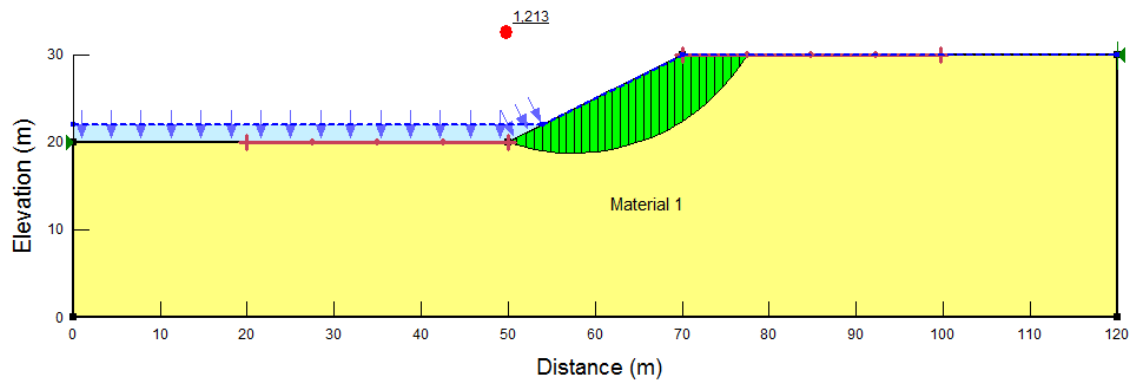


Figura 29 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

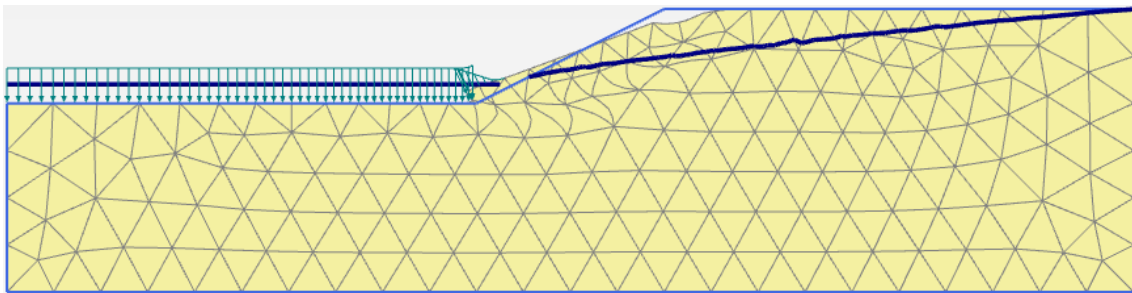
- $\varphi = 20$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

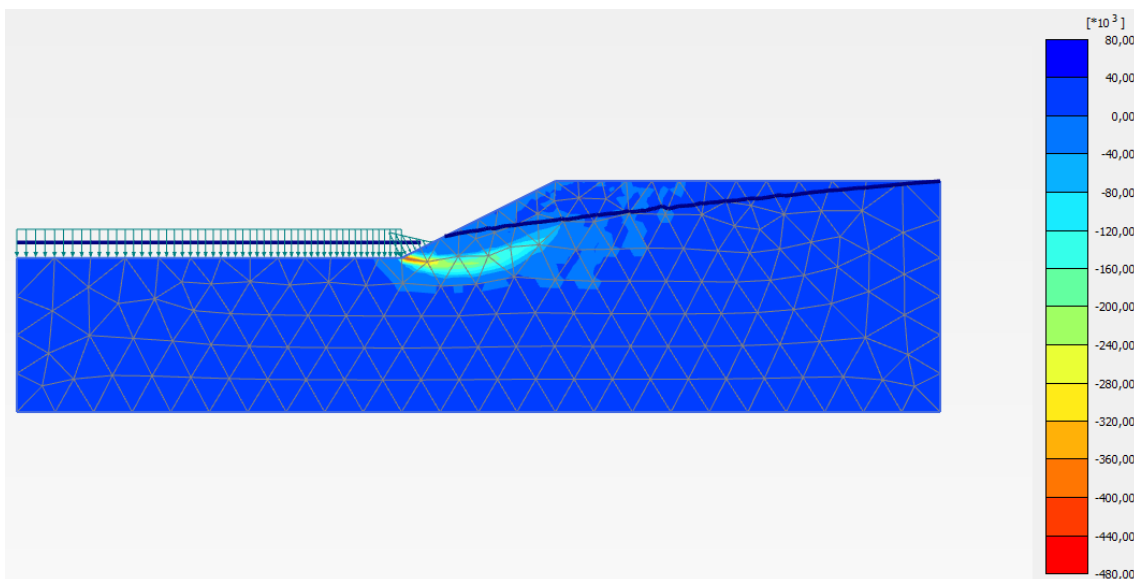
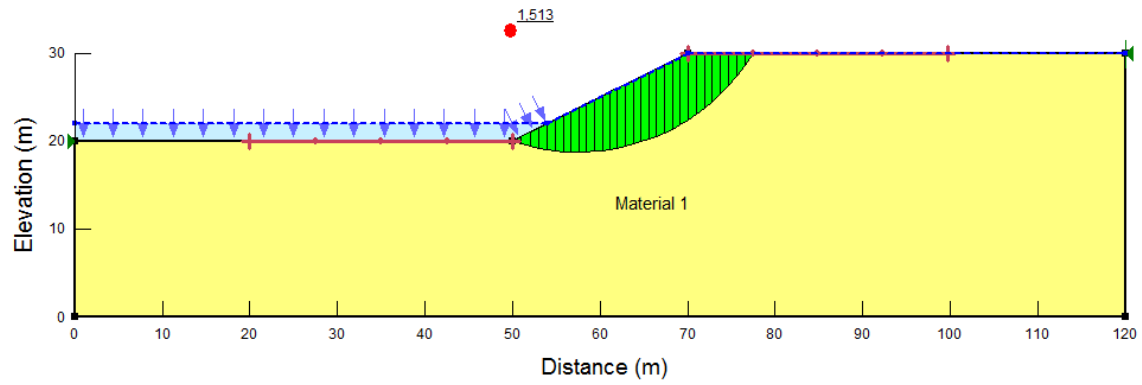


Figura 30 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

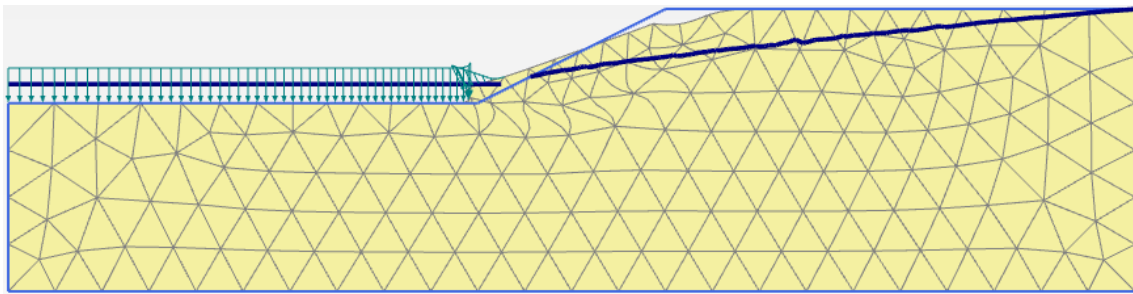
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

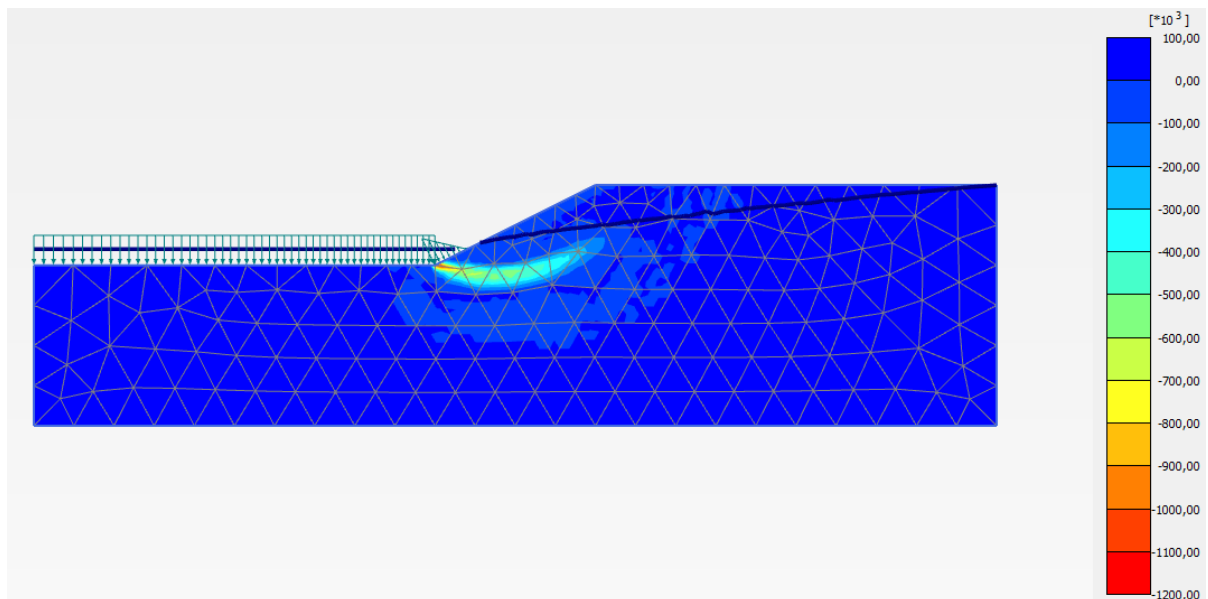
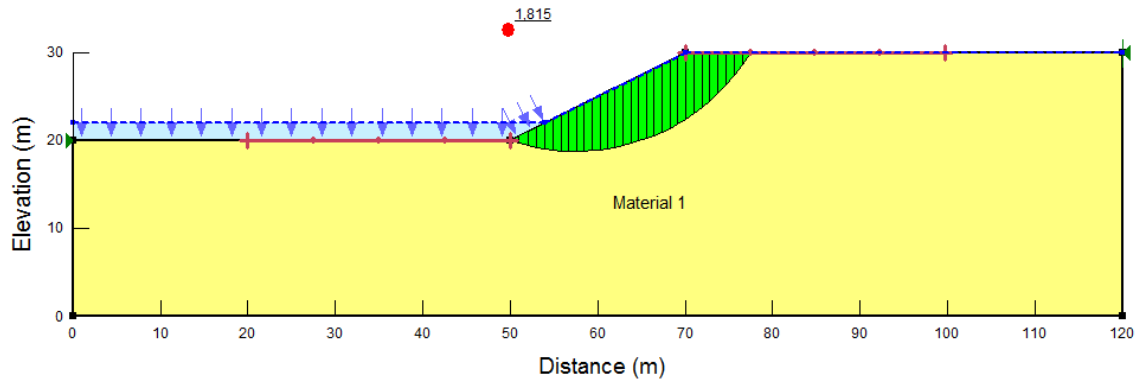


Figura 31 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

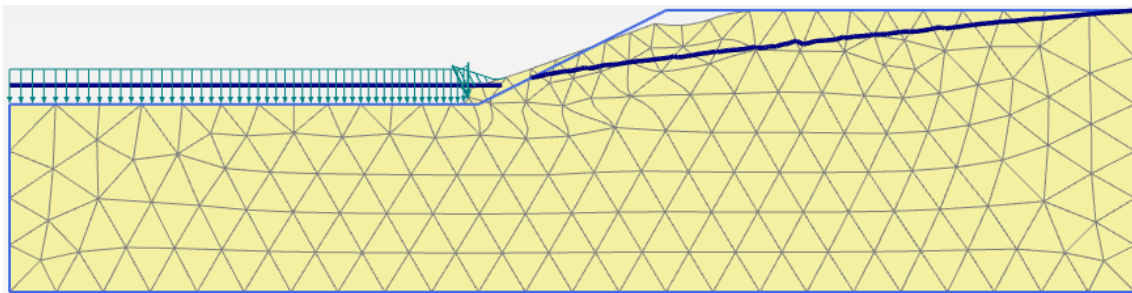
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

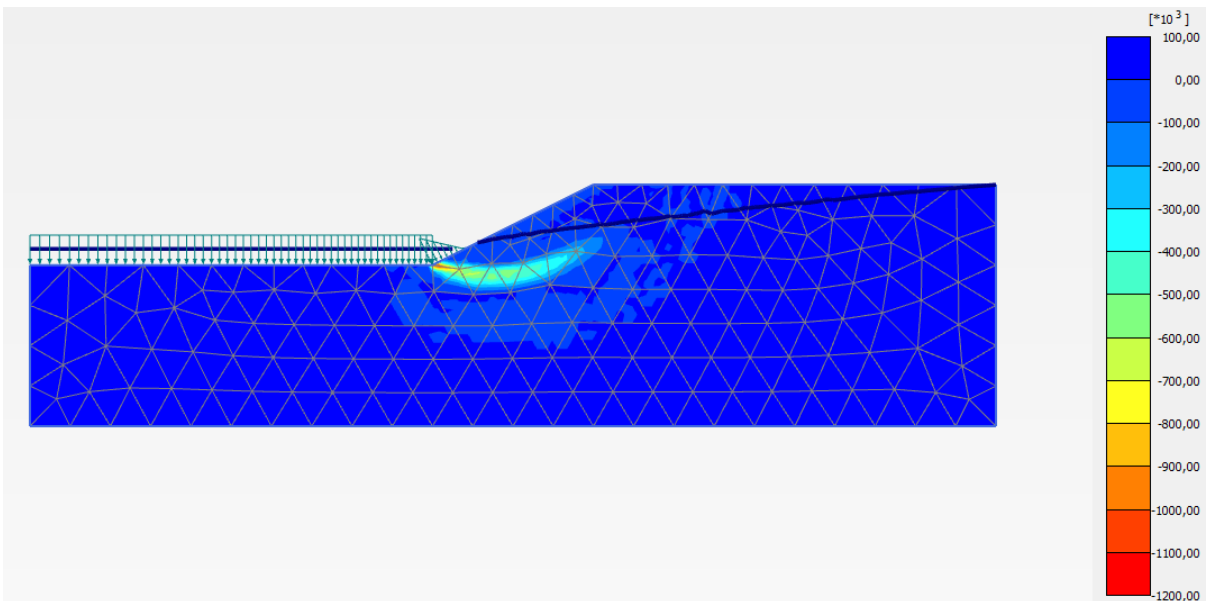
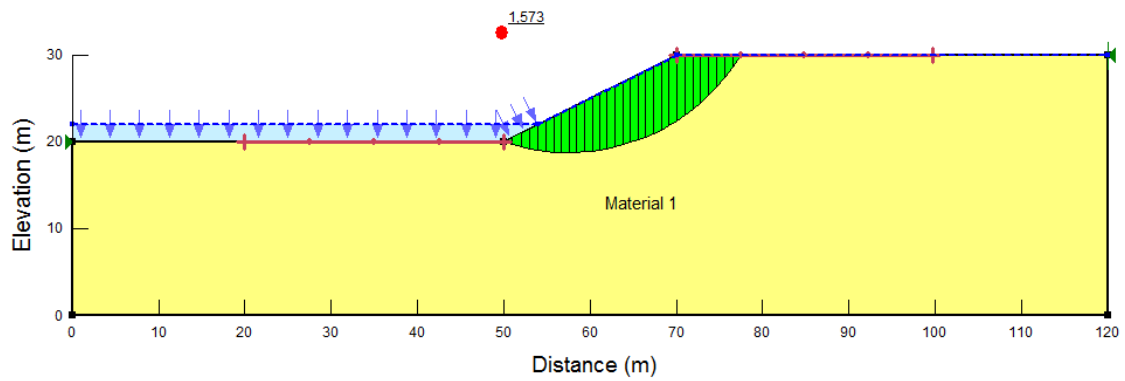


Figura 32 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

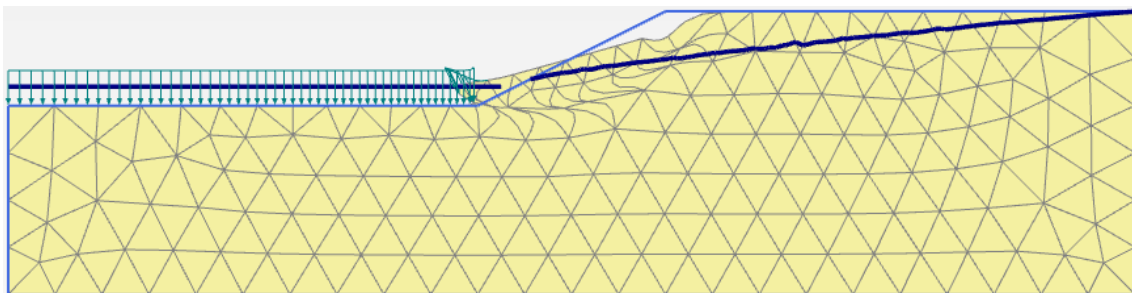
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

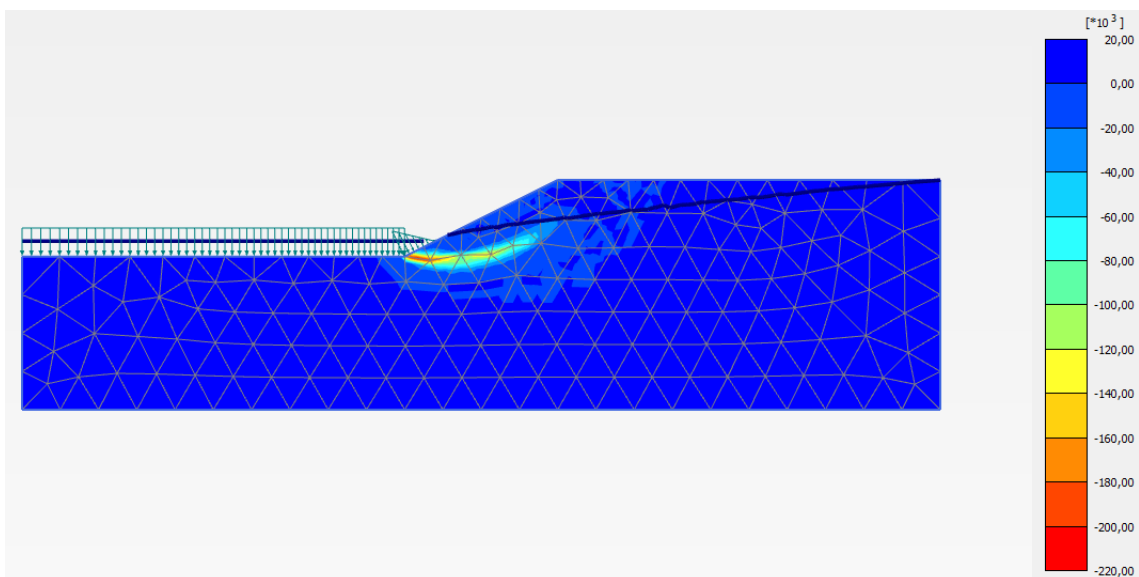
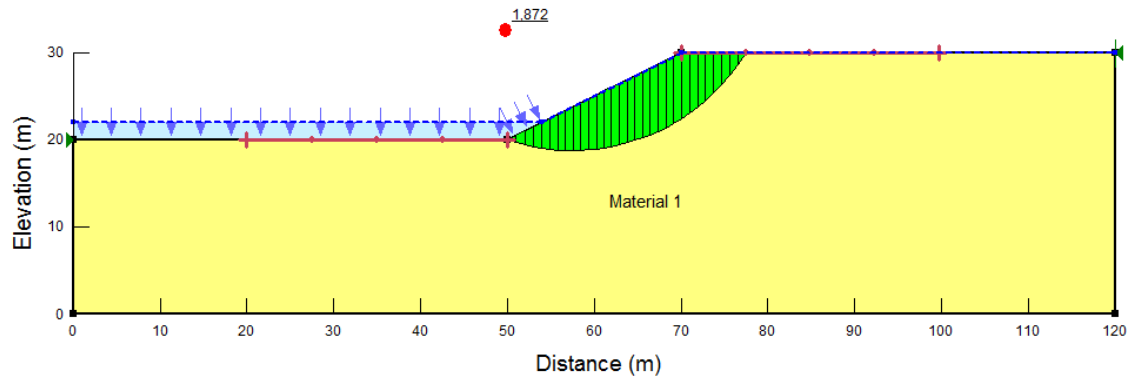


Figura 33 Cas 1. $H=2m$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

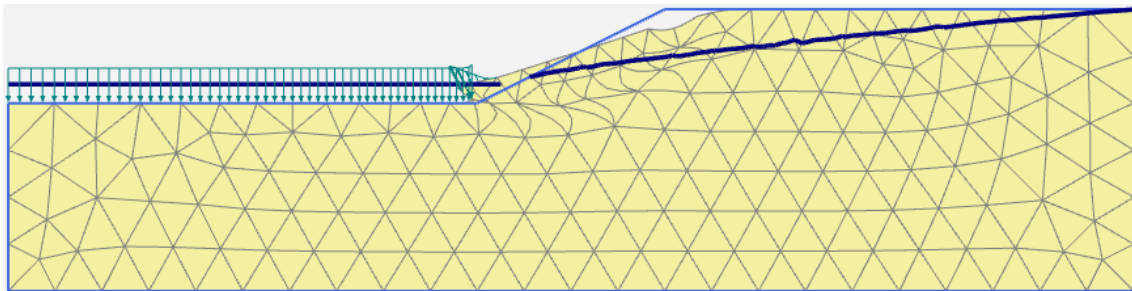
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

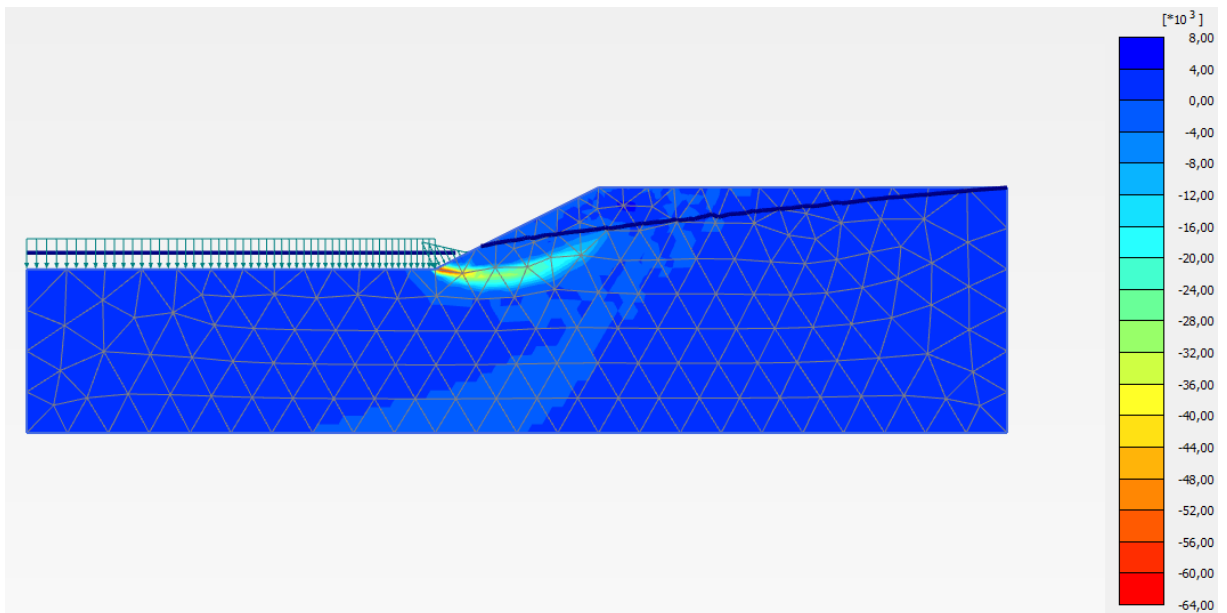
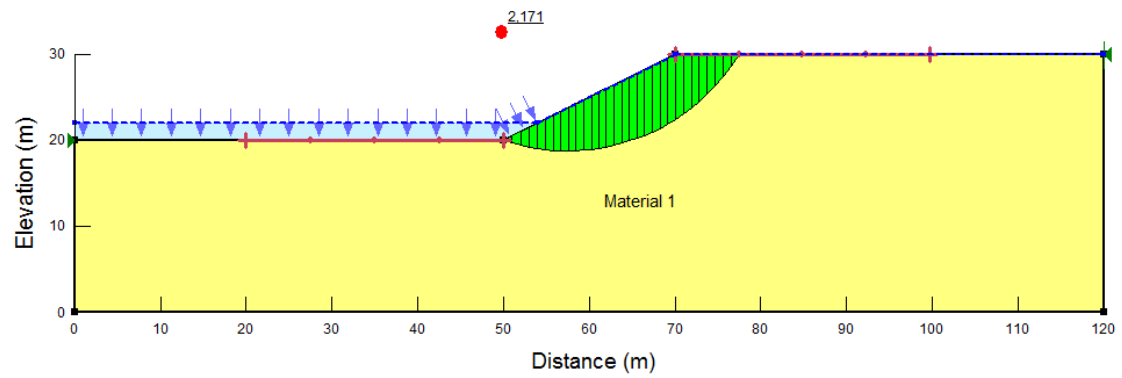


Figura 34 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

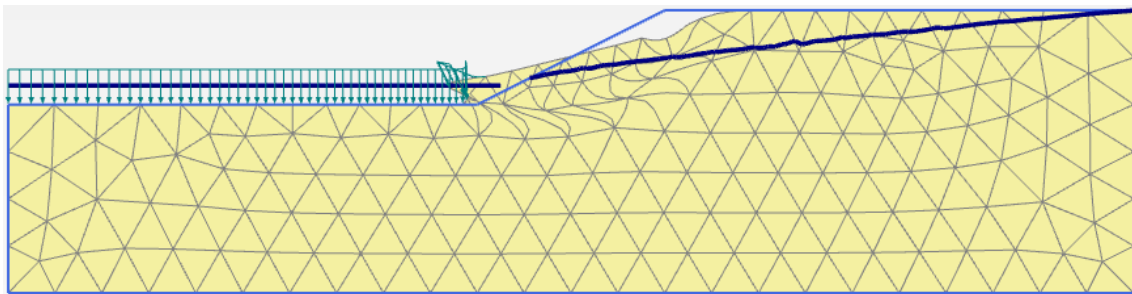
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

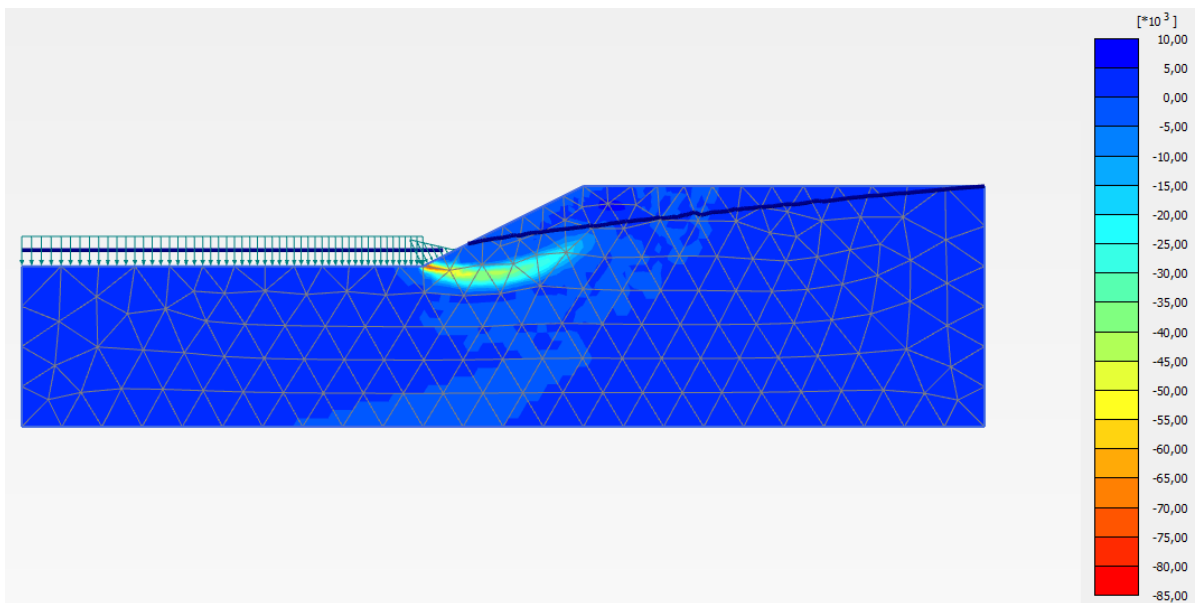
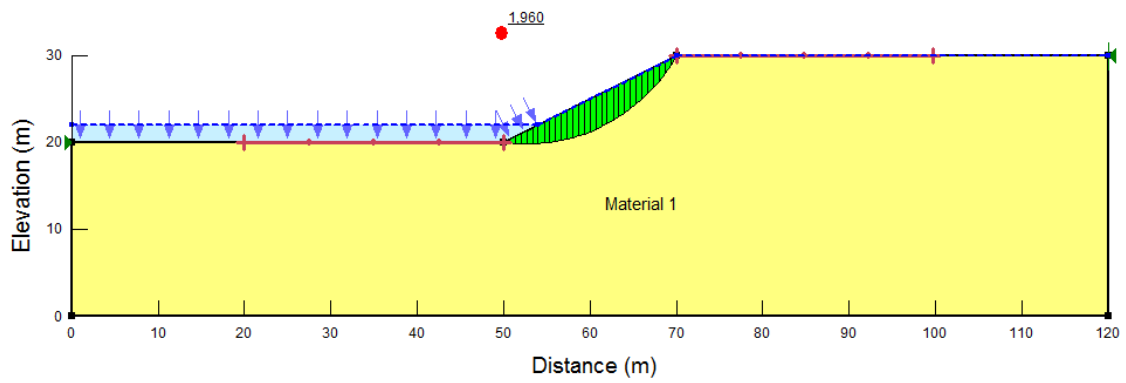


Figura 35 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

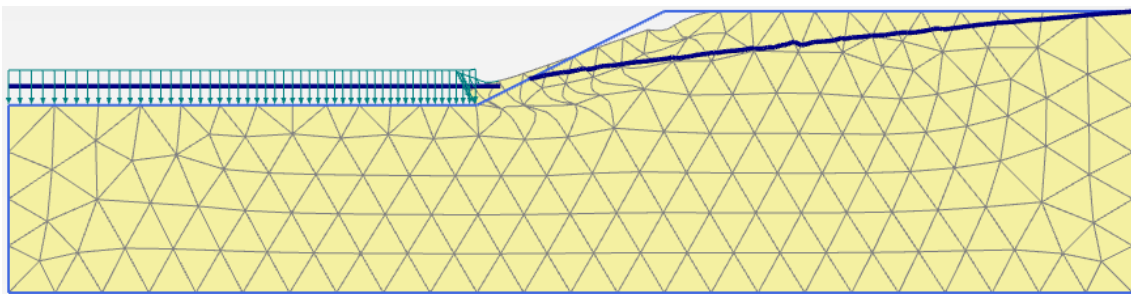
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

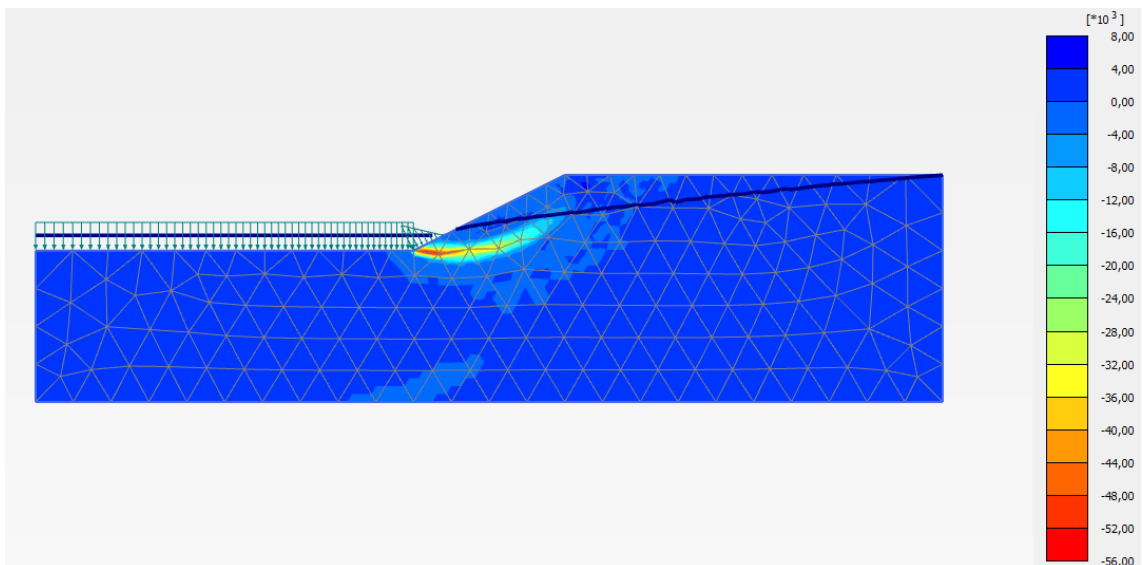
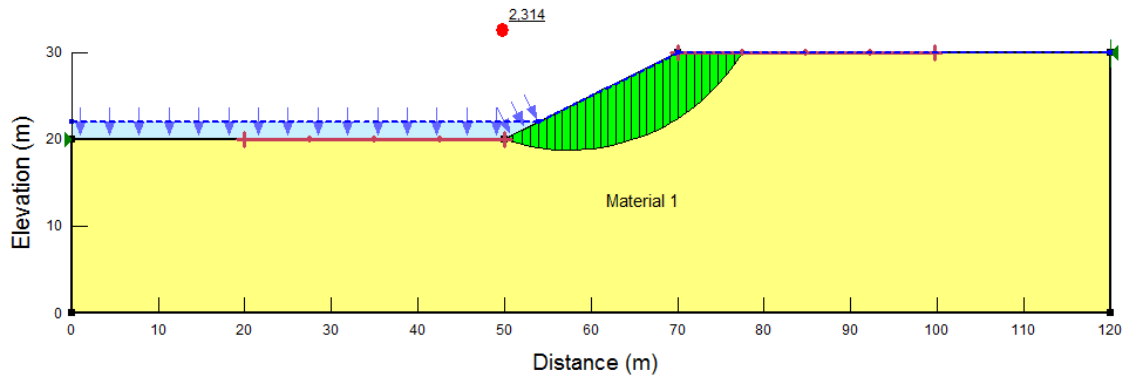


Figura 36 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

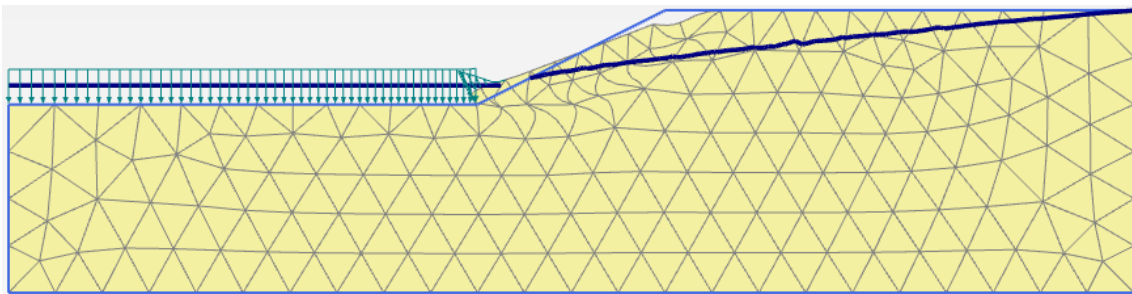
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

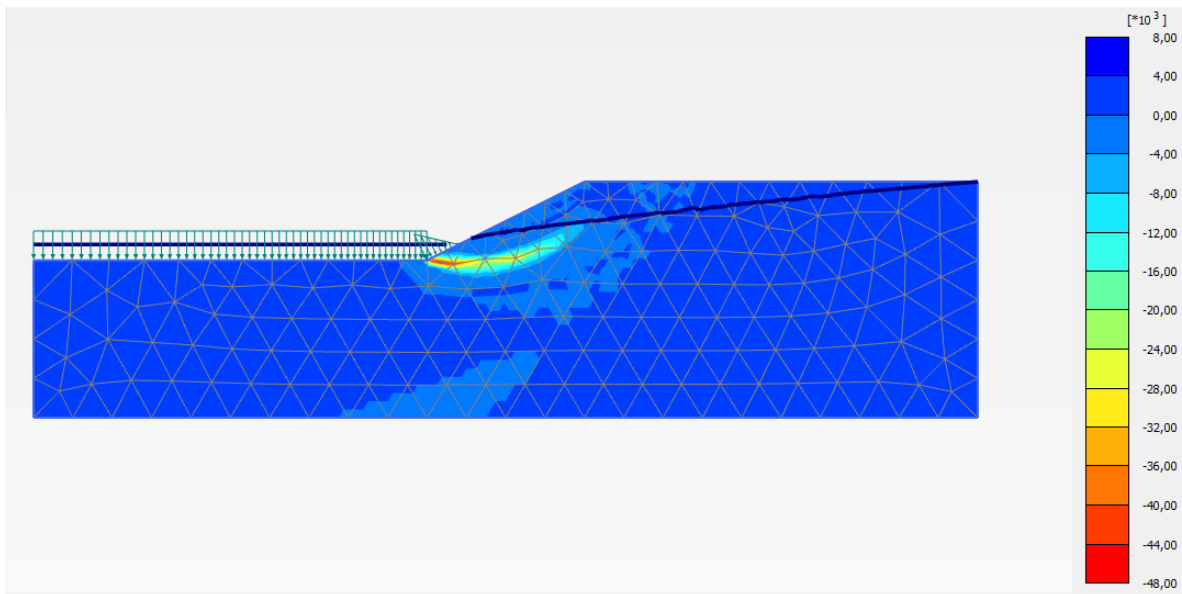
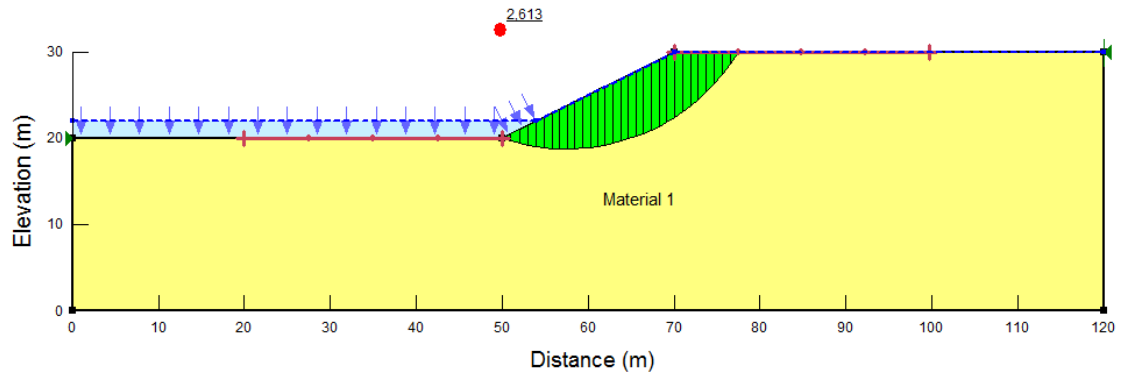


Figura 37 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

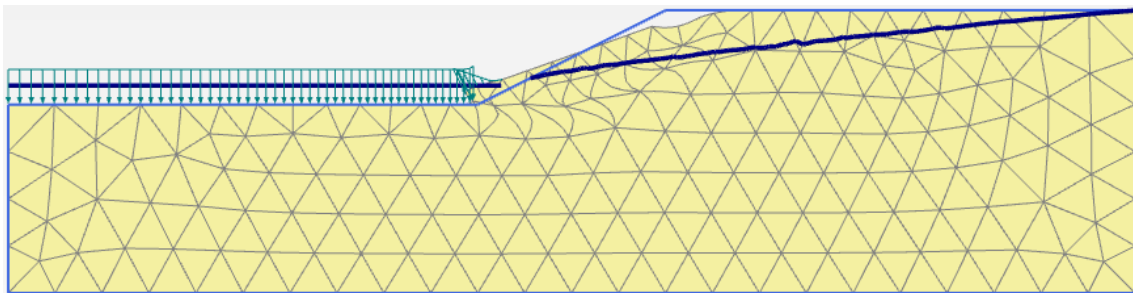
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

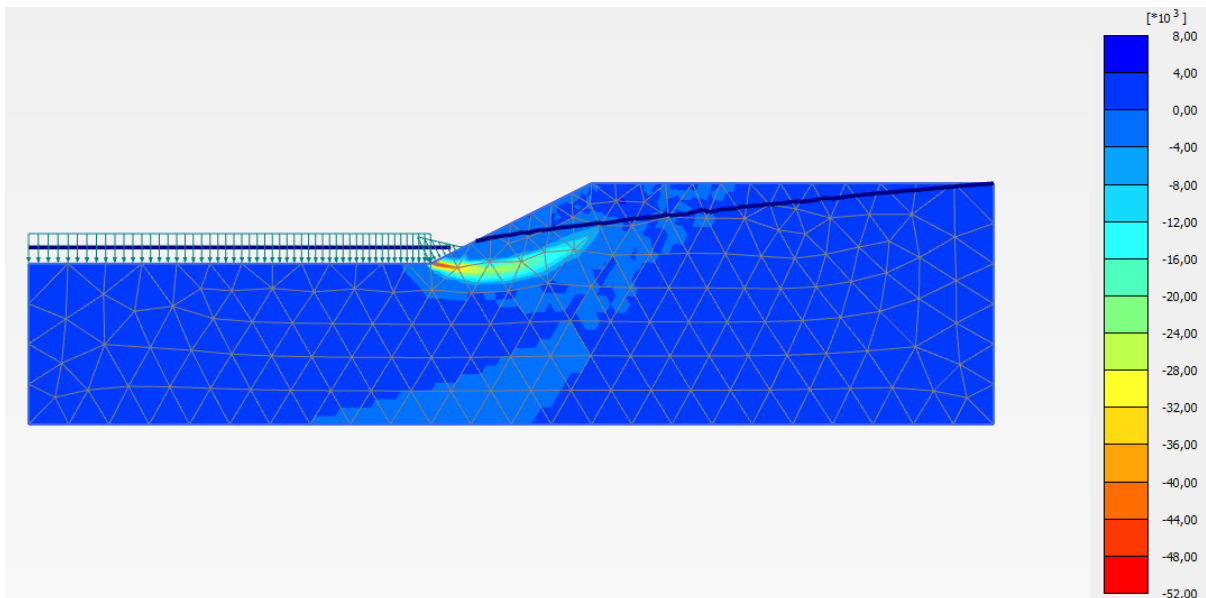
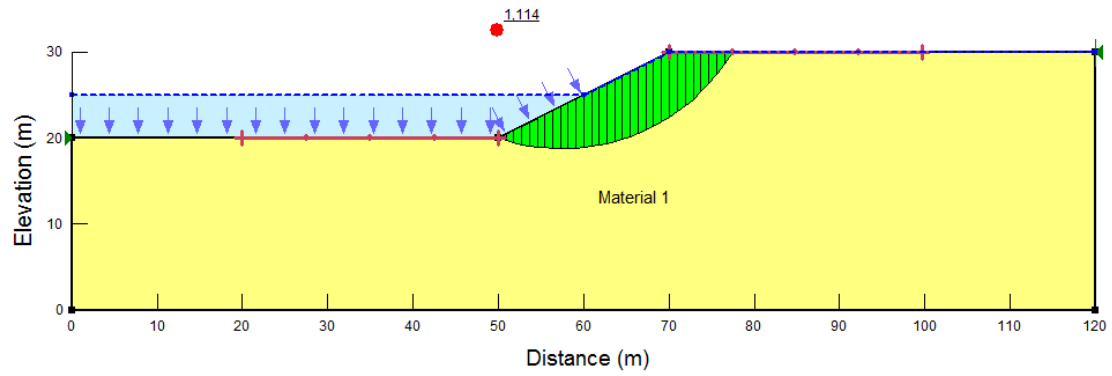


Figura 38 Cas 1. $H=2\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

4.3.3.3 $H_w = 5$ metres

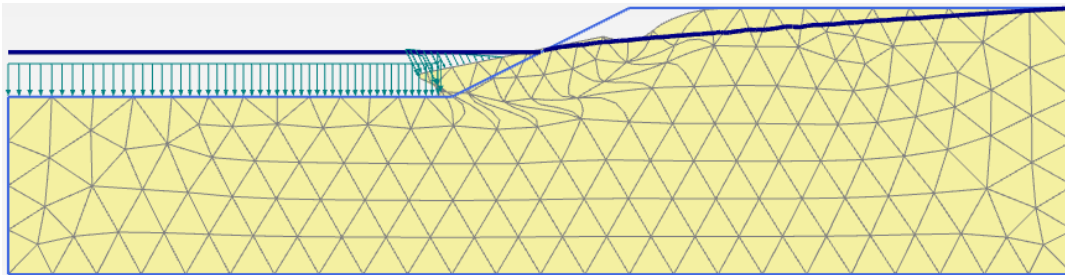
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18$ kPa
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

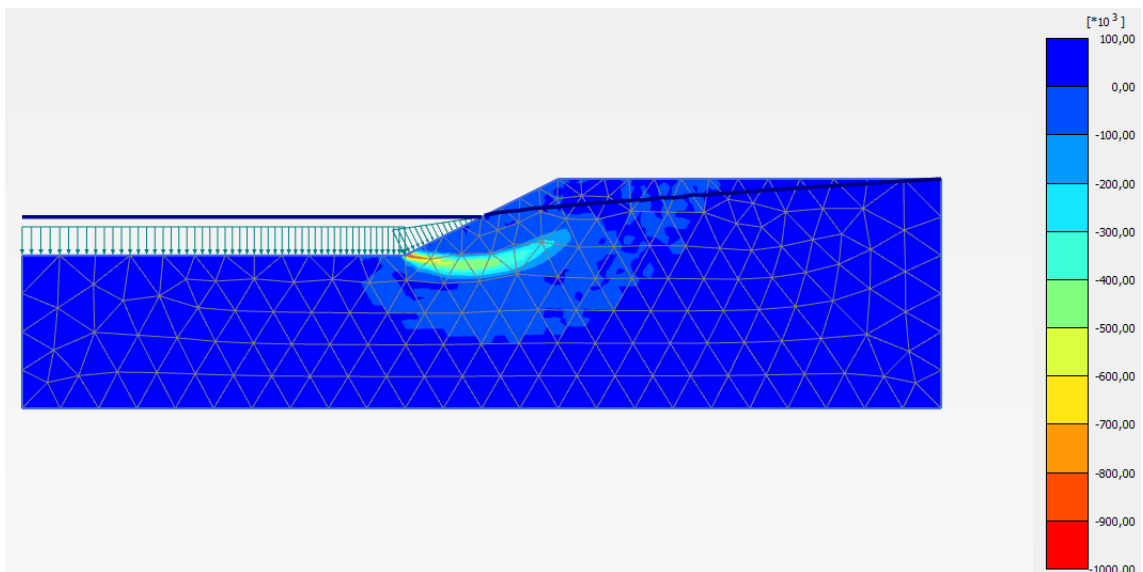
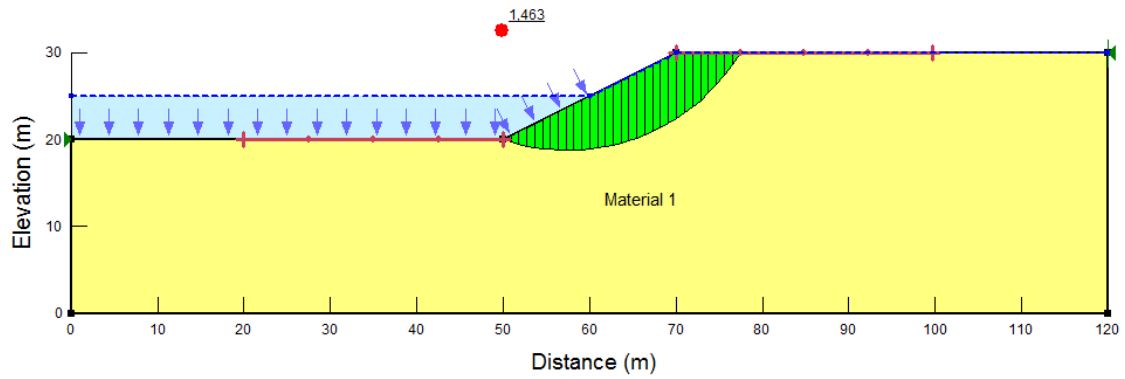


Figura 39 Cas 1. $H=5m$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

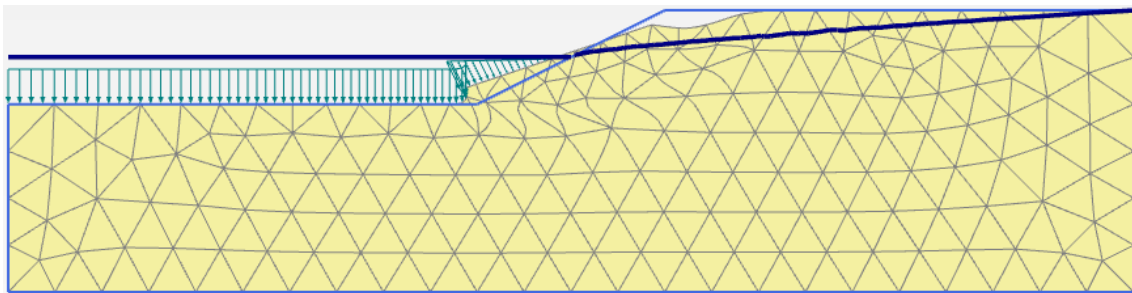
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

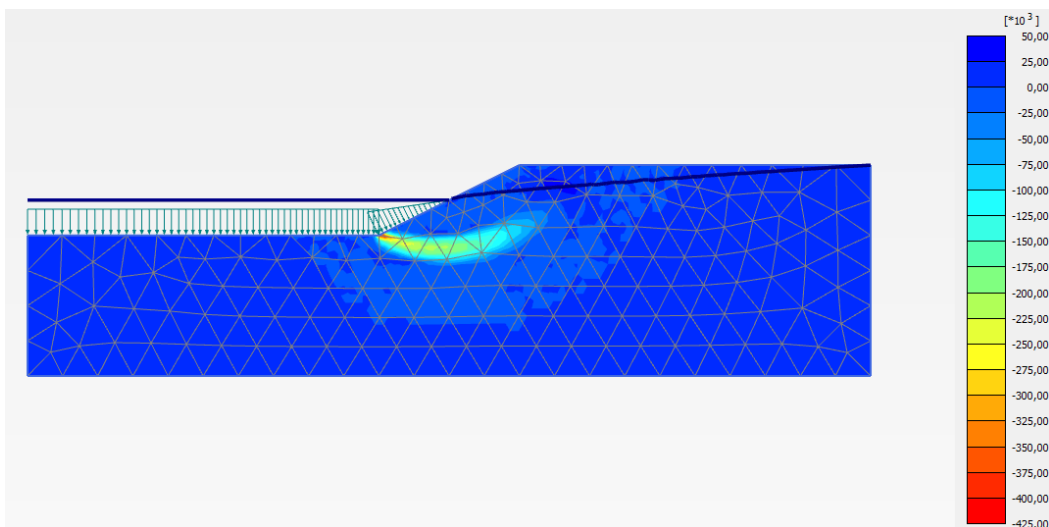
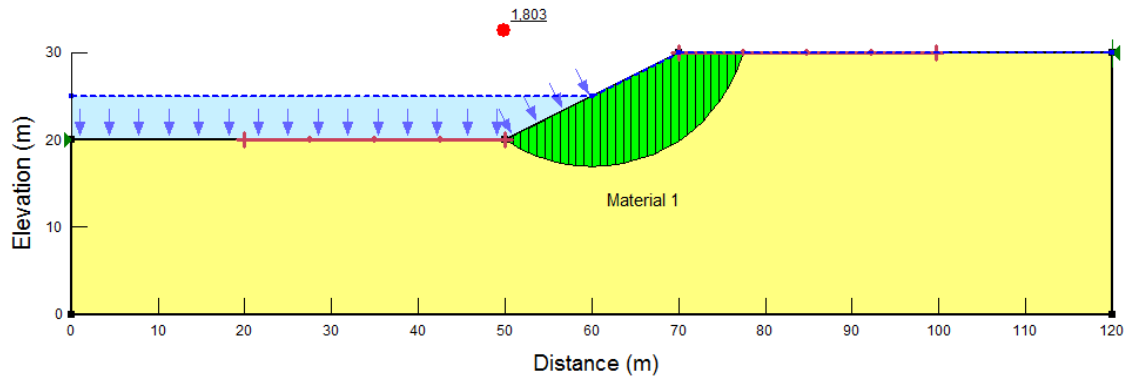


Figura 40 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

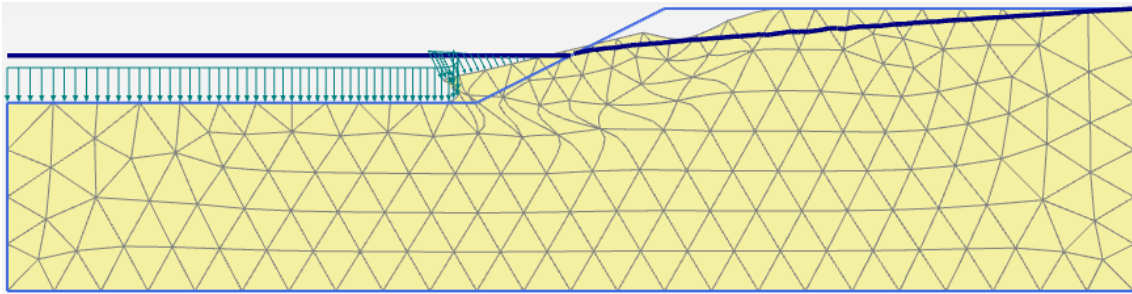
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

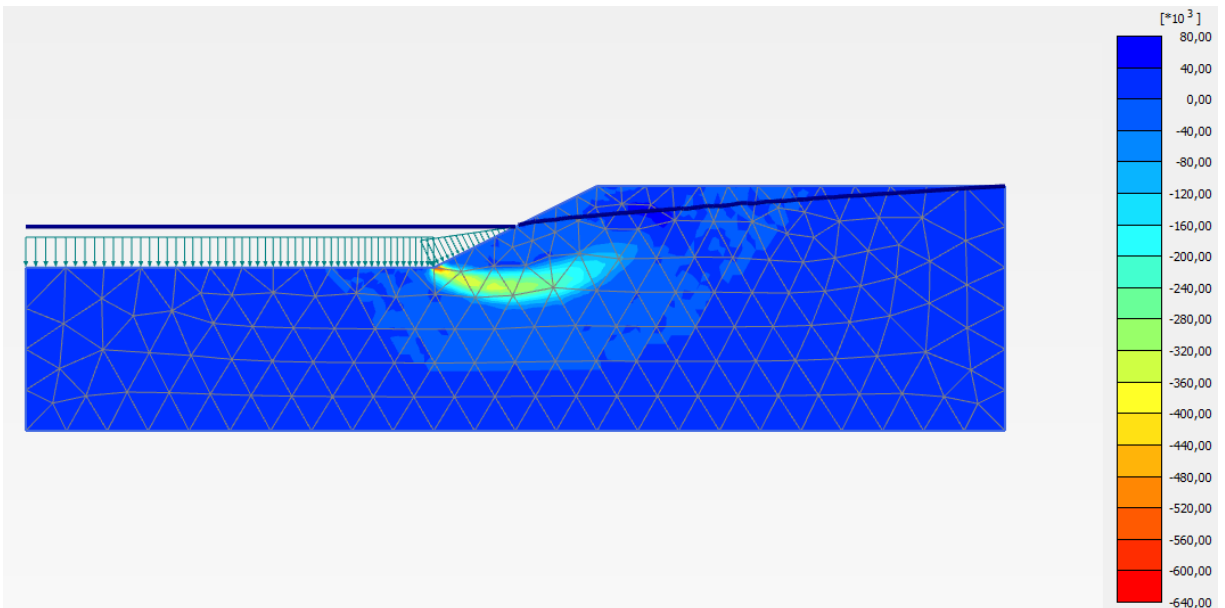
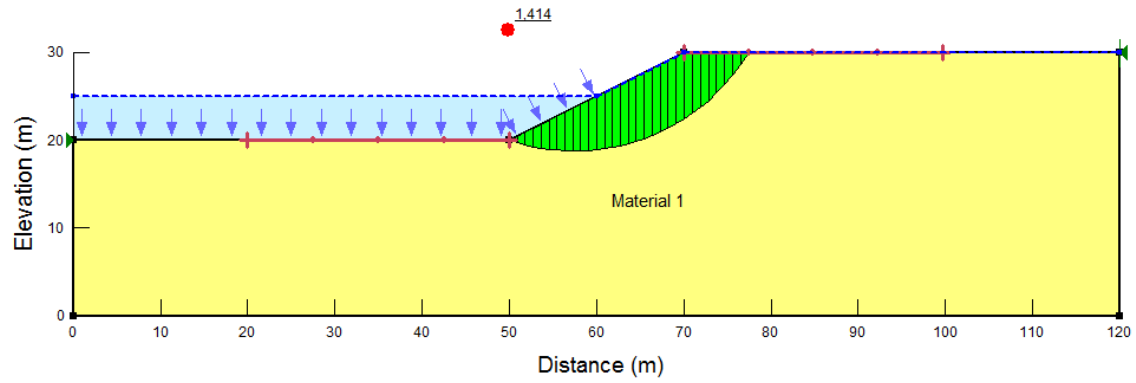


Figura 41 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

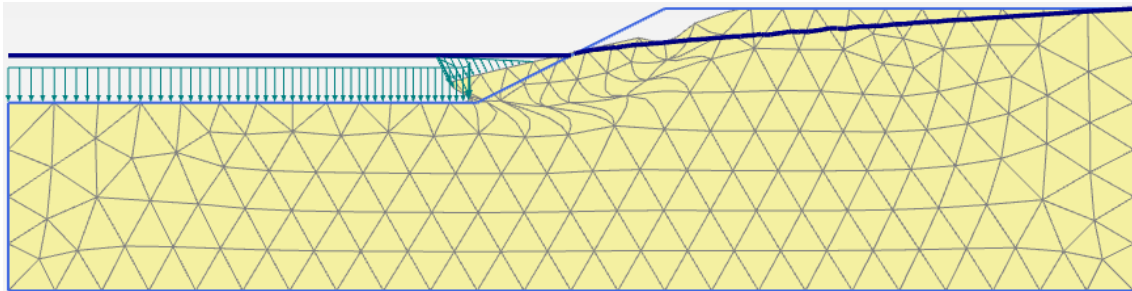
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

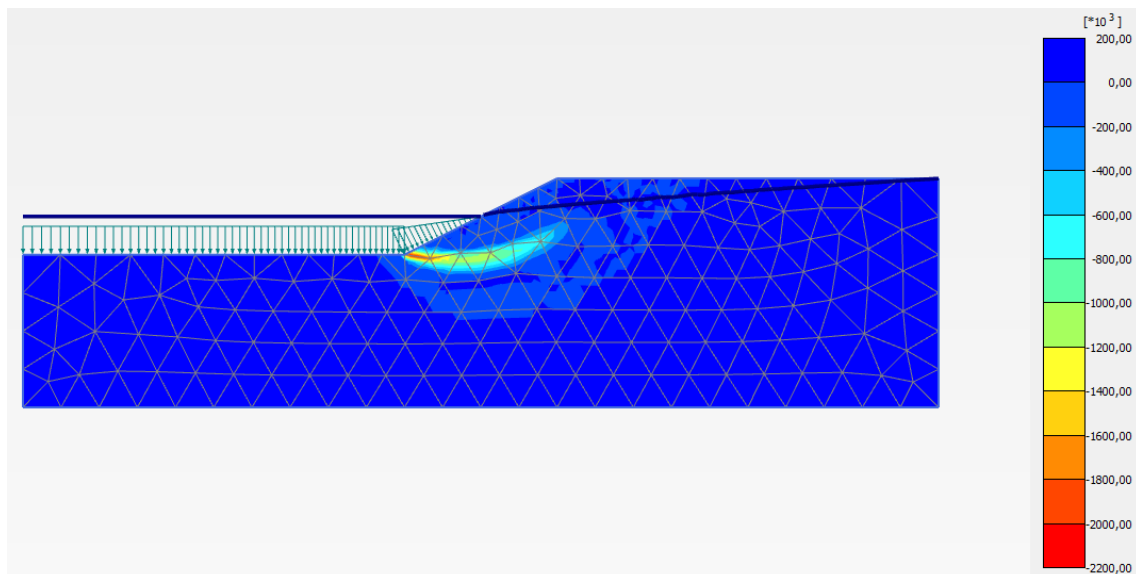
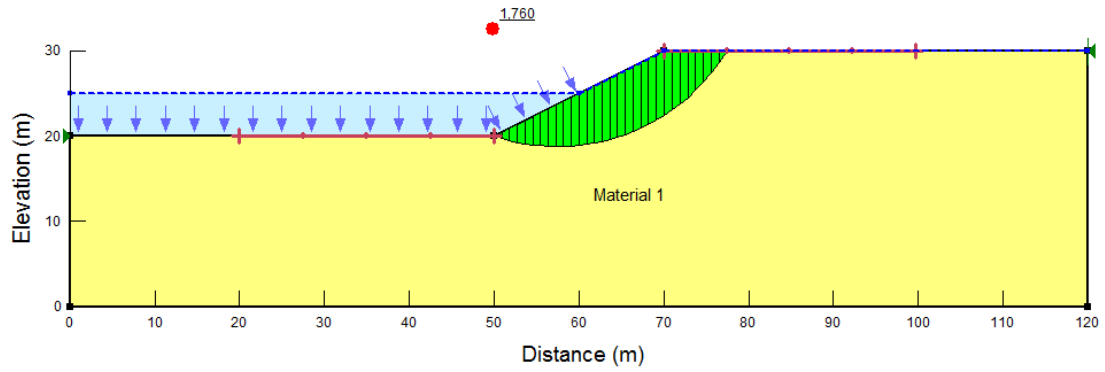


Figura 42 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

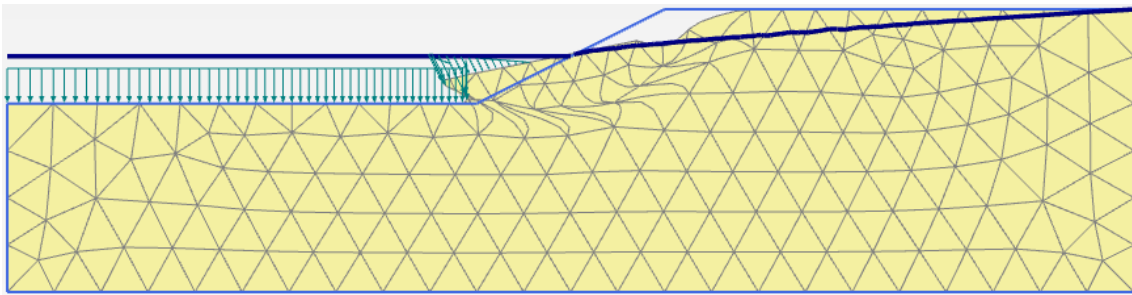
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

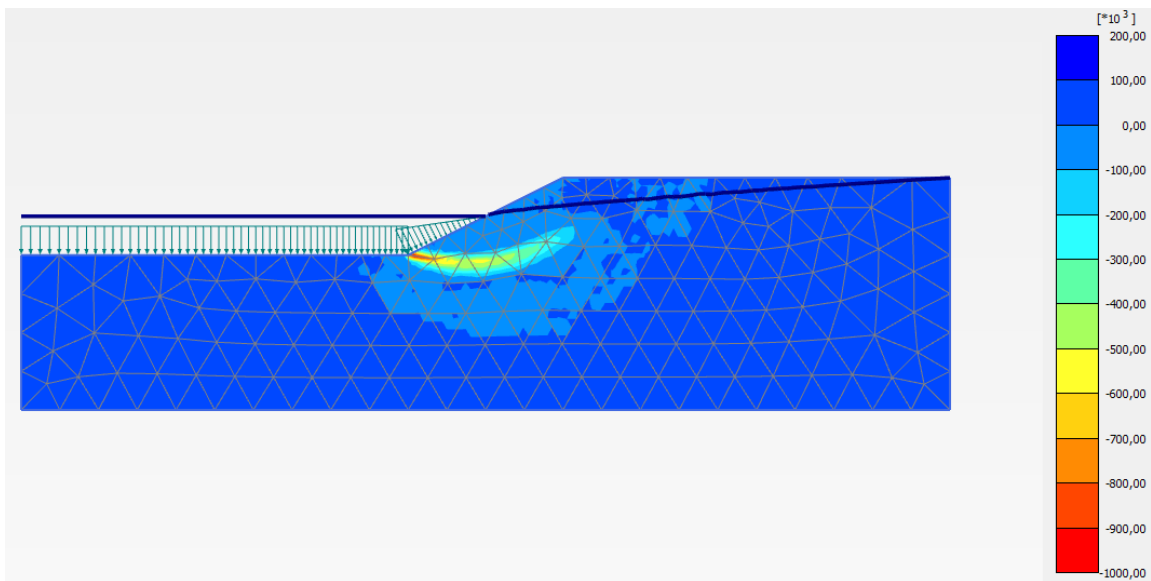
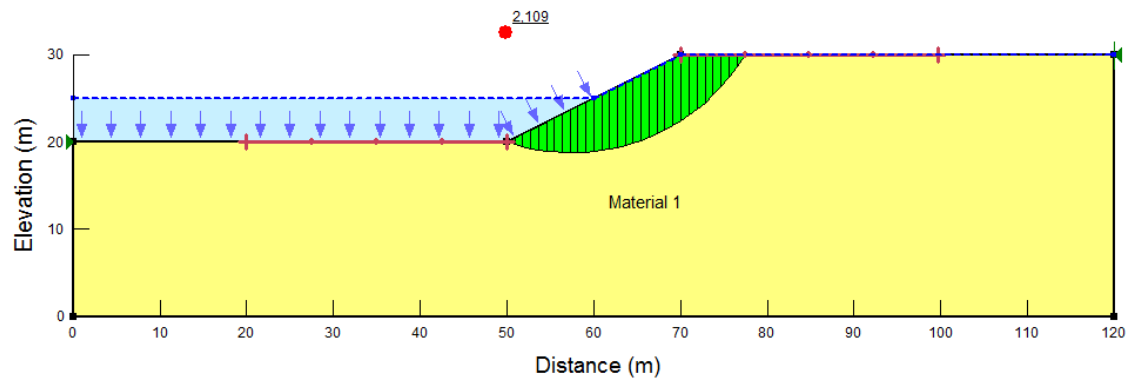


Figura 43 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

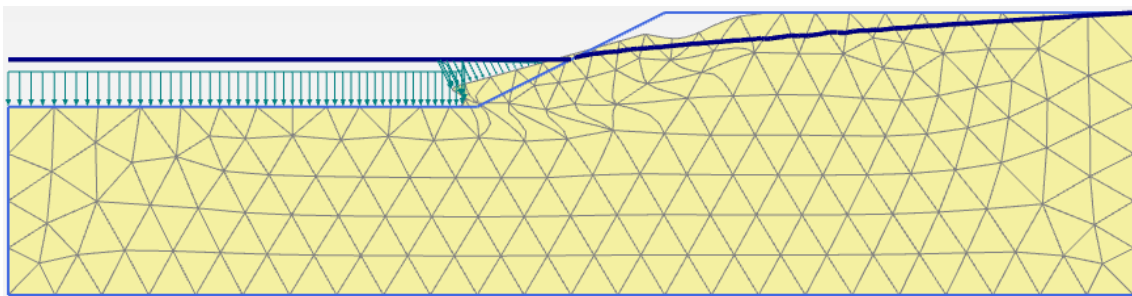
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

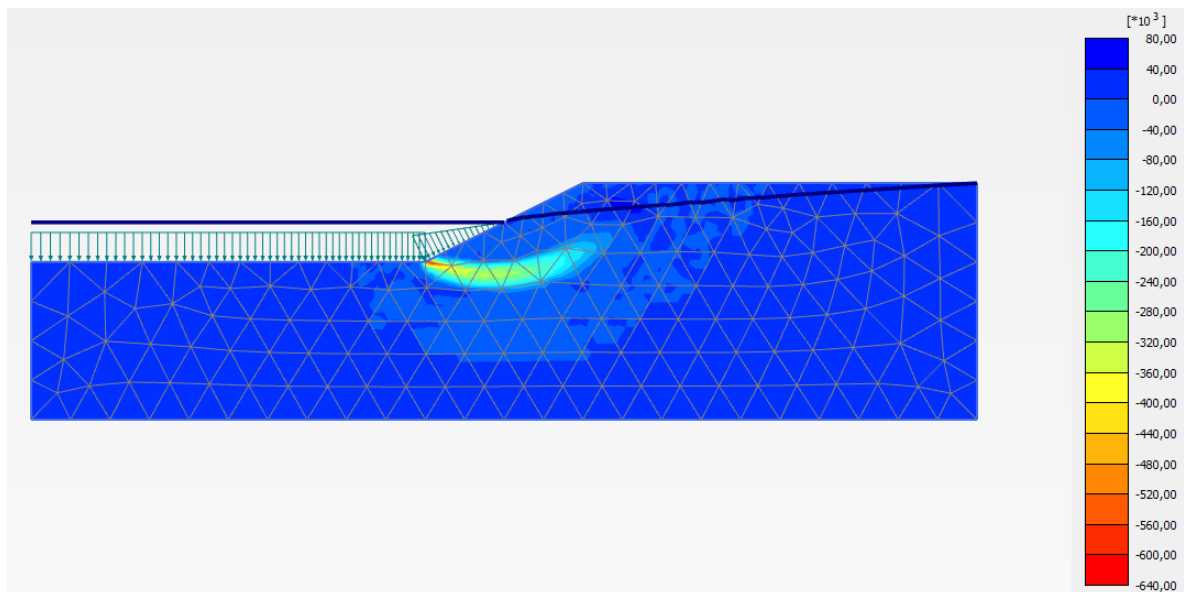
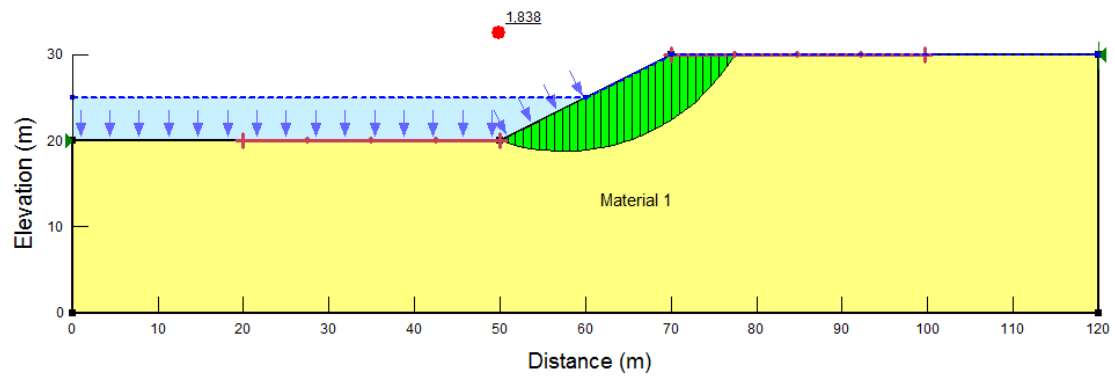


Figura 44 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

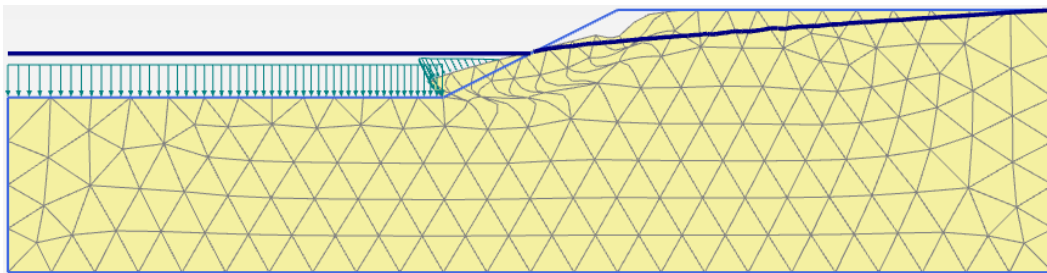
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

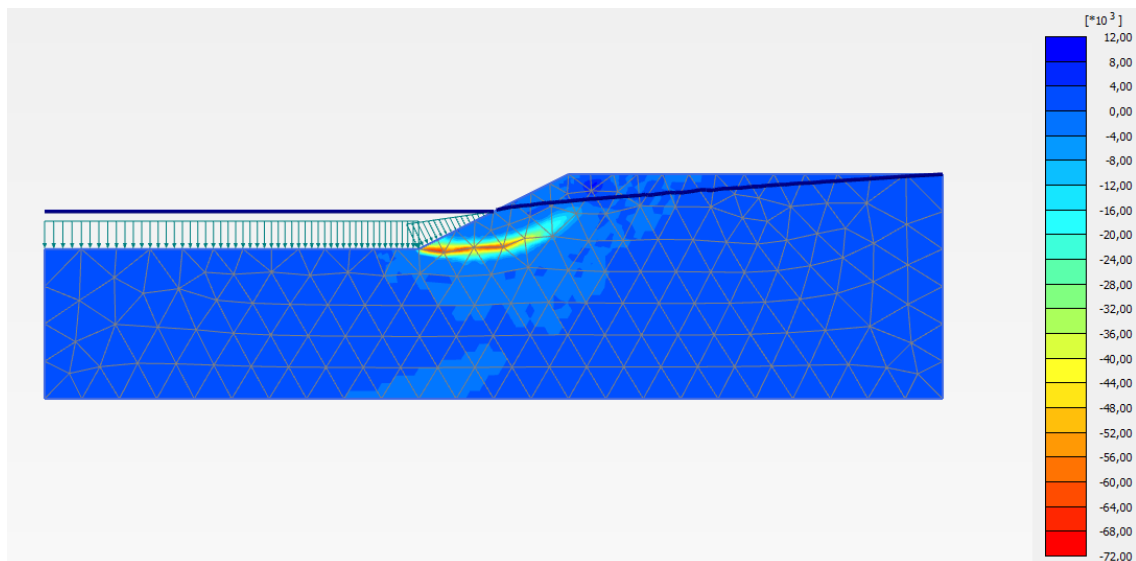
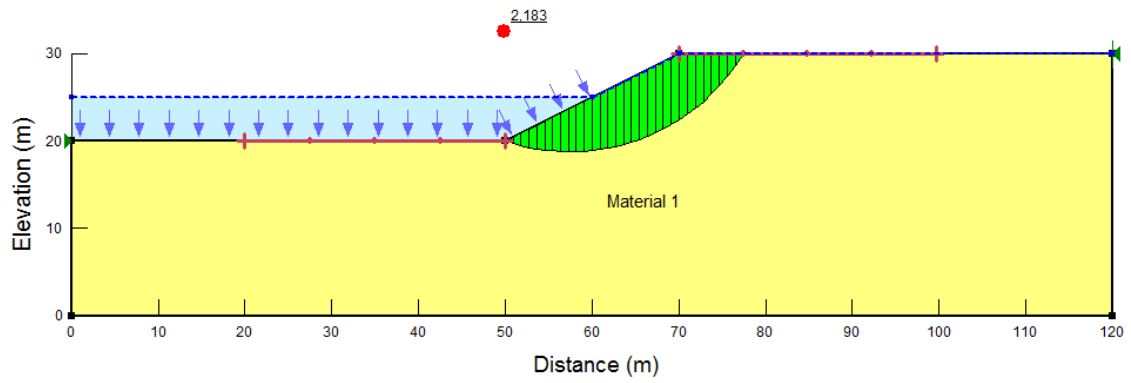


Figura 45 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

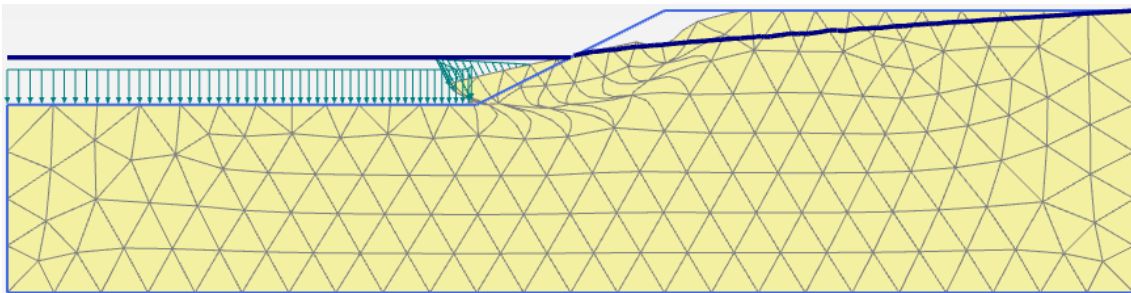
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

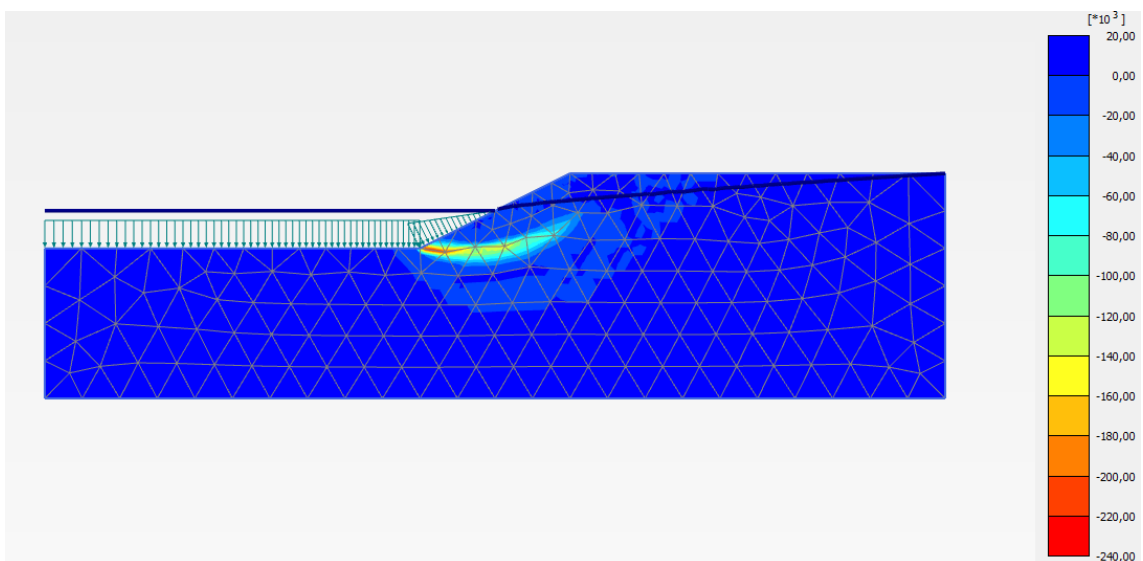
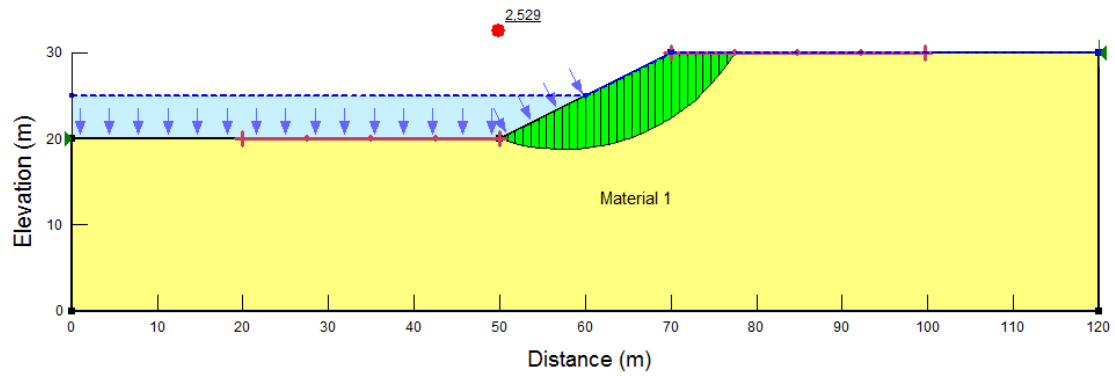


Figura 46 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c = 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

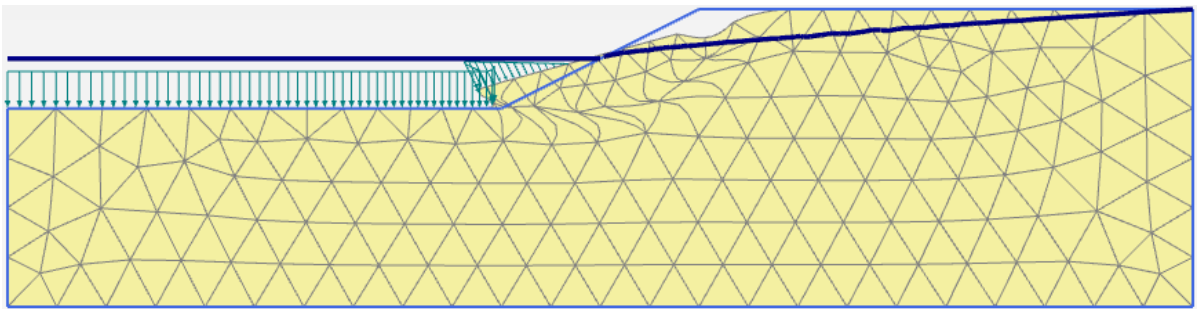
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

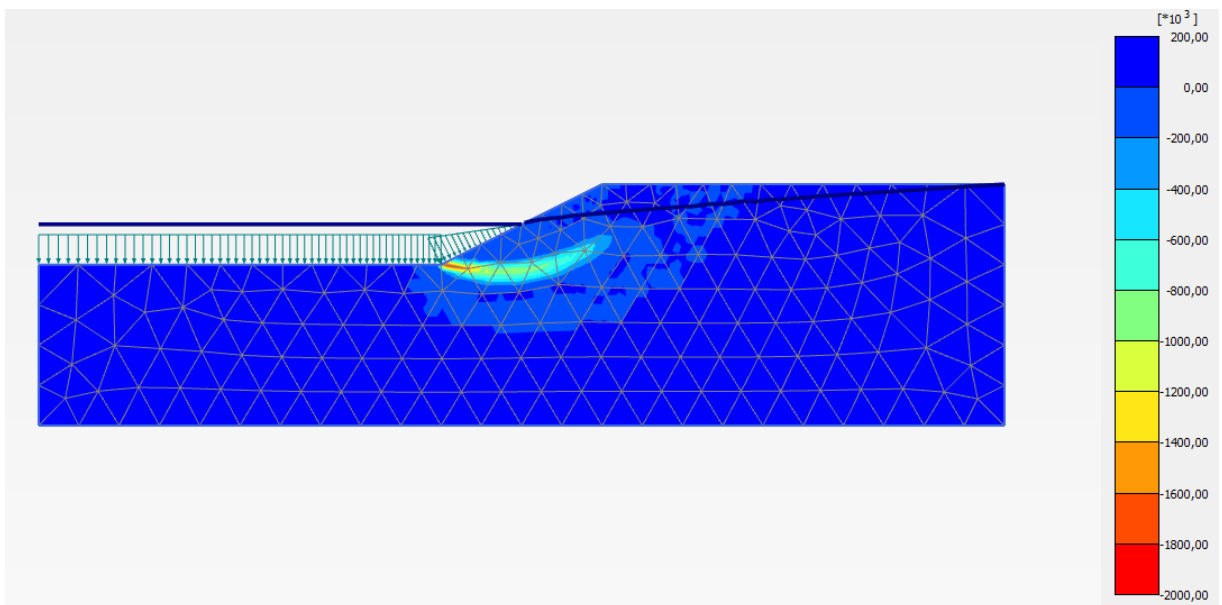
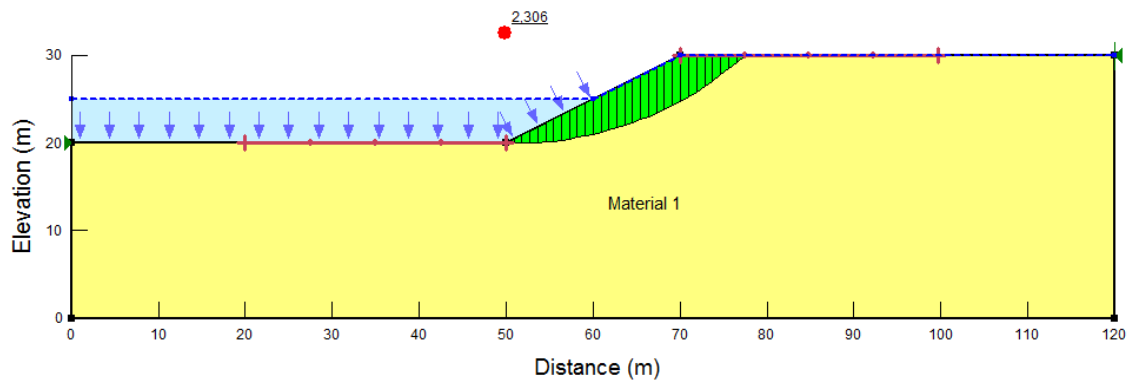


Figura 47 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

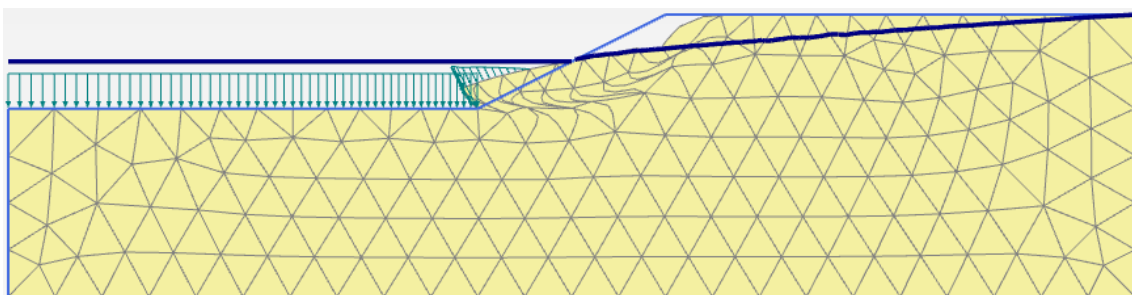
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

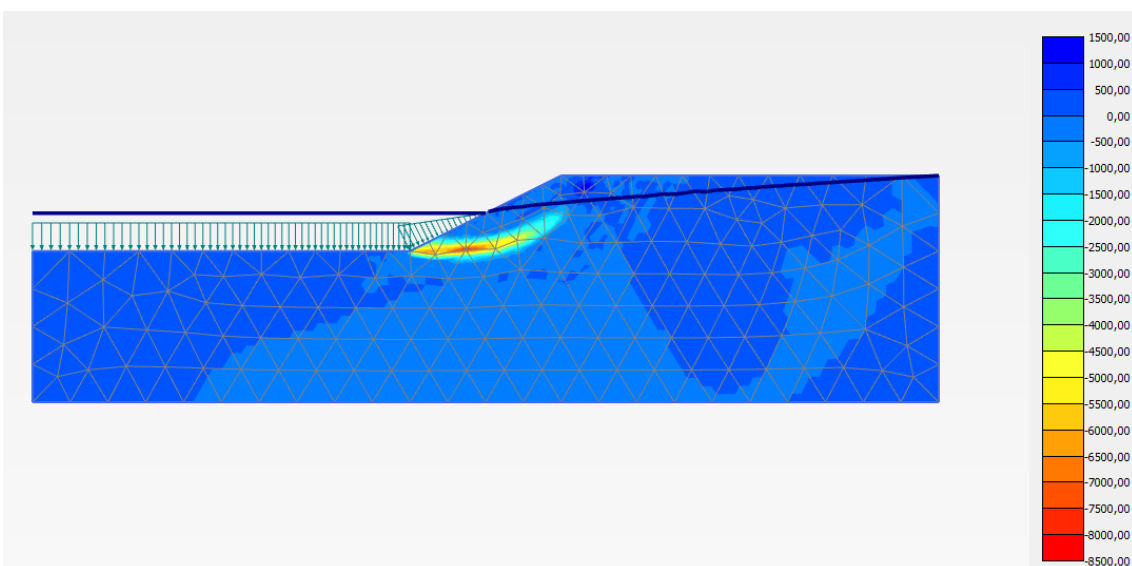
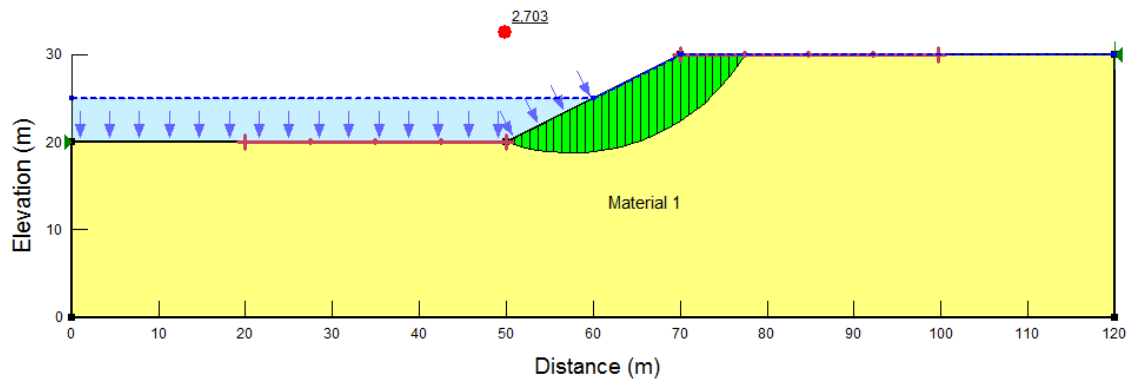


Figura 48 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

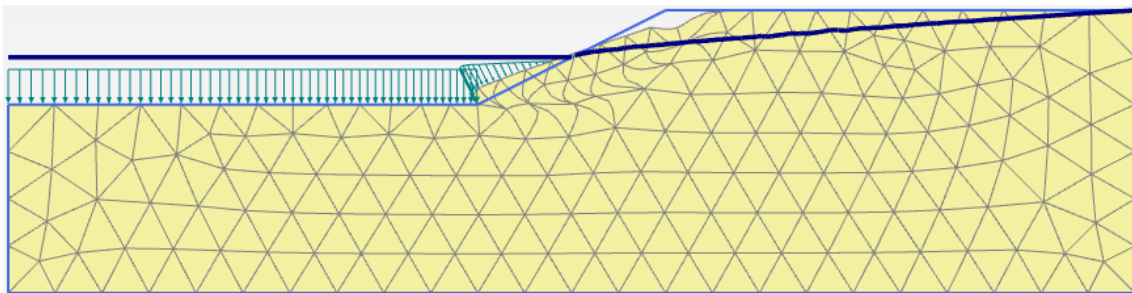
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

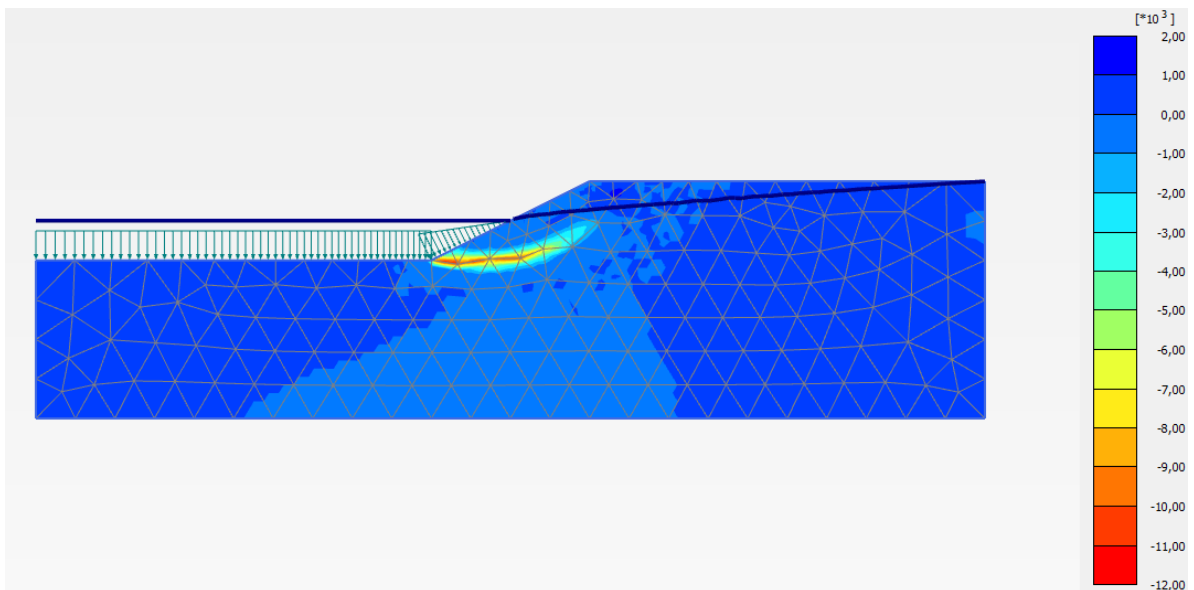
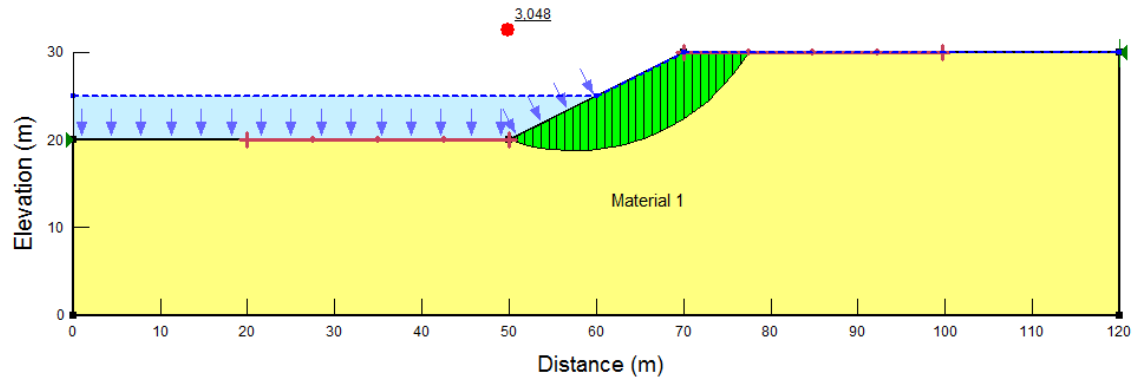


Figura 49 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

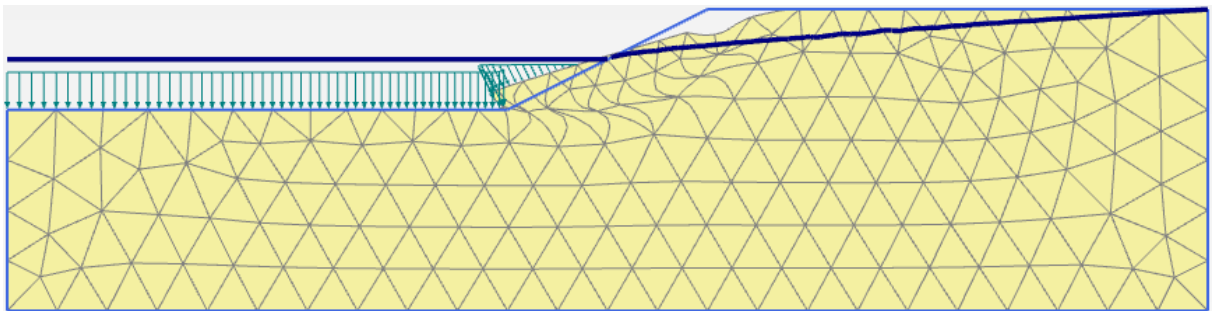
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

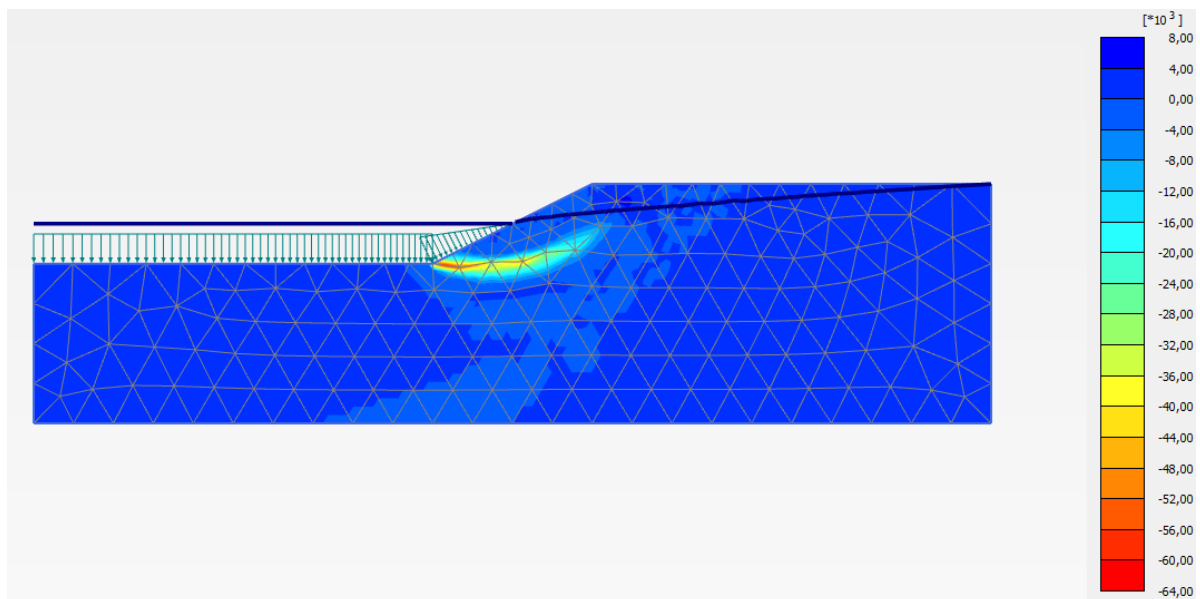
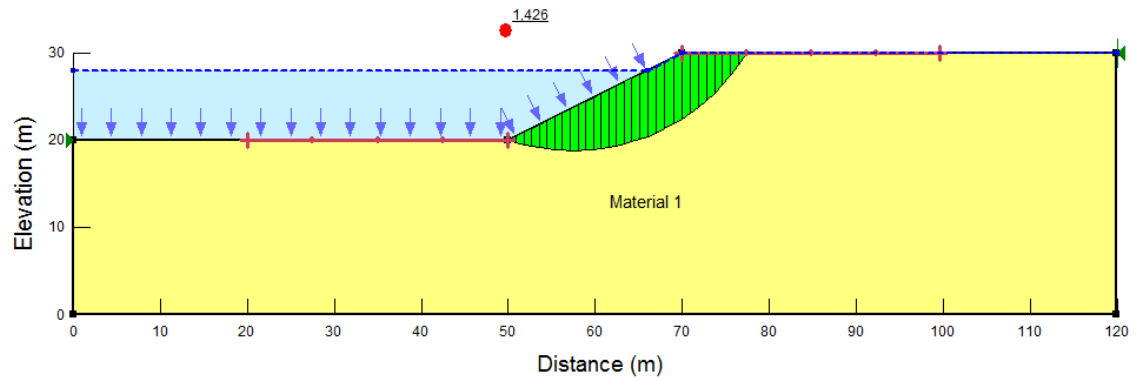


Figura 50 Cas 1. $H=5\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

4.3.3.4 $H_w = 8$ metres

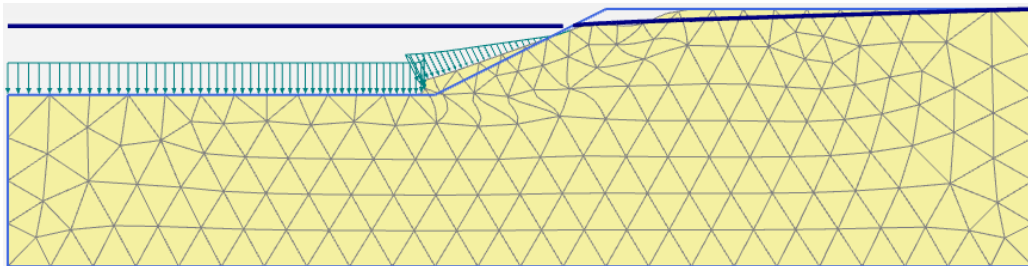
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18$ kPa
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

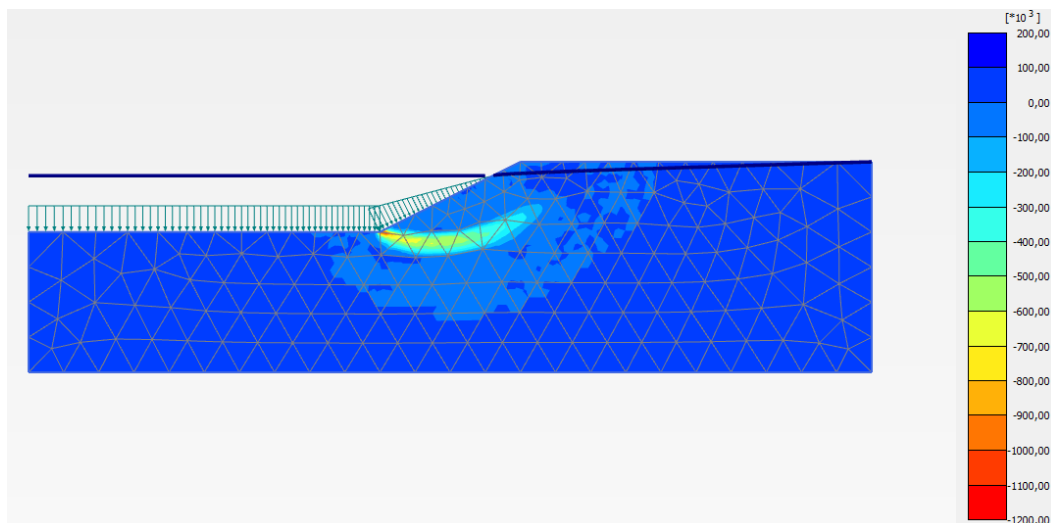
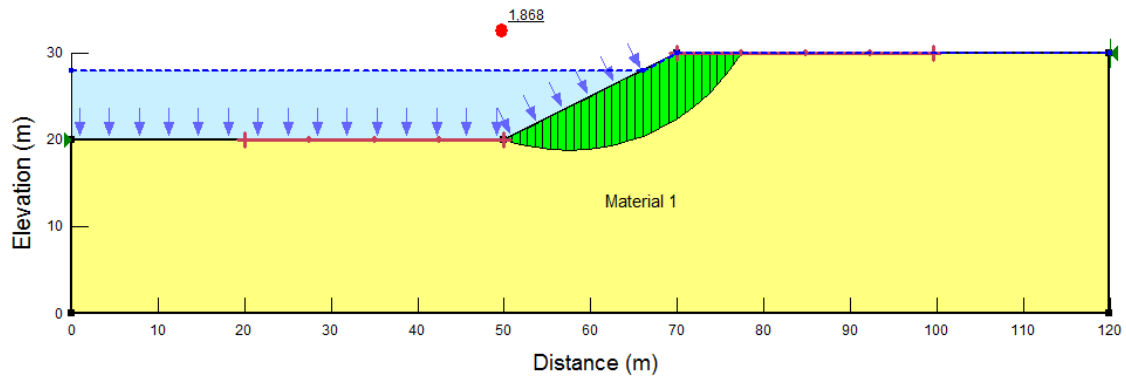


Figura 51 Cas 1. $H=8$ m, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

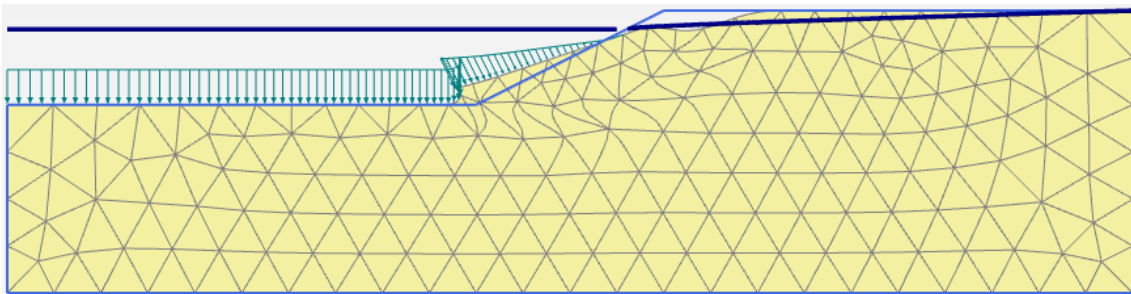
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

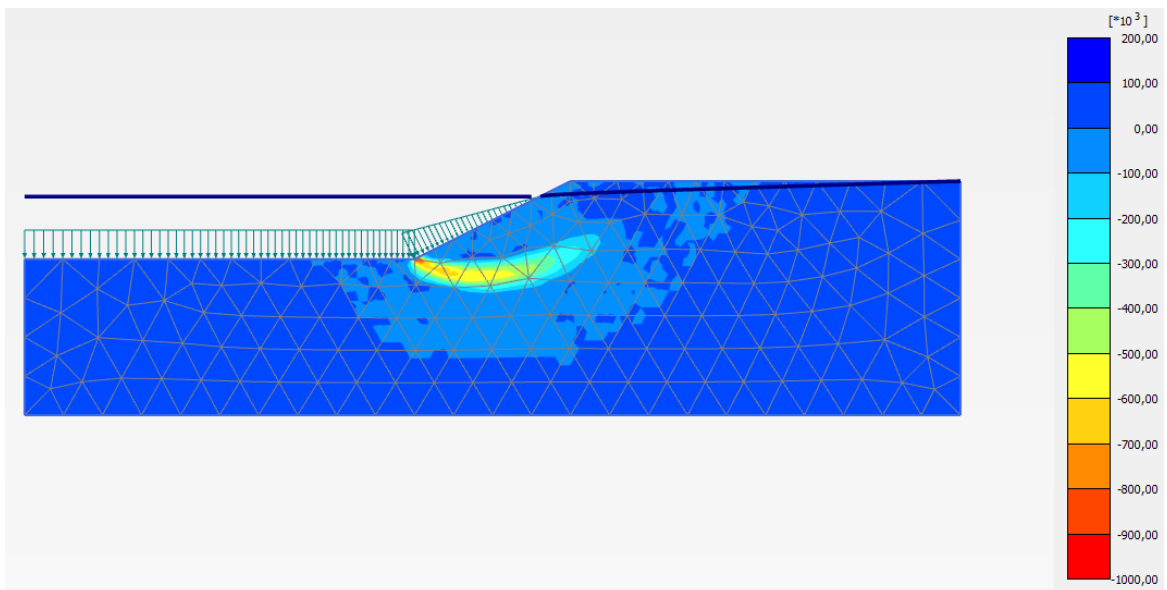
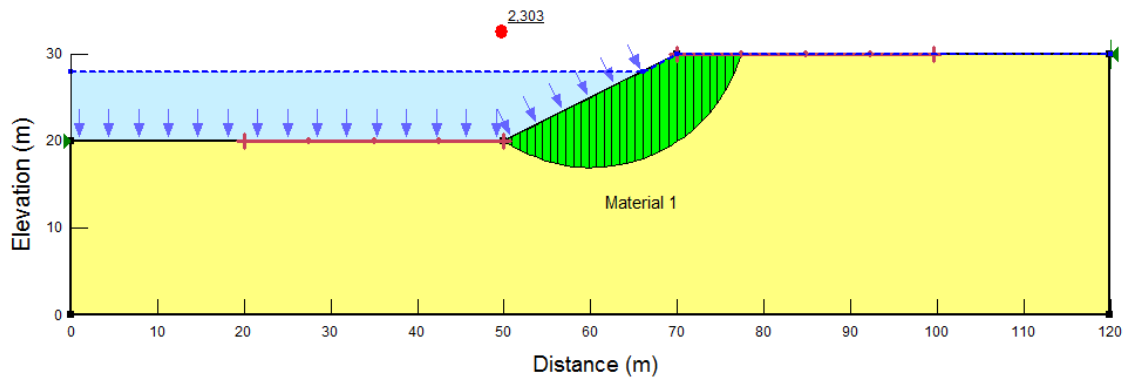


Figura 52 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

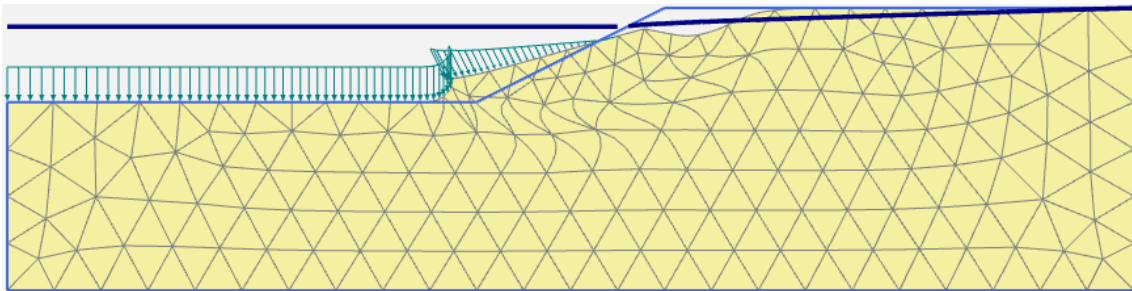
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

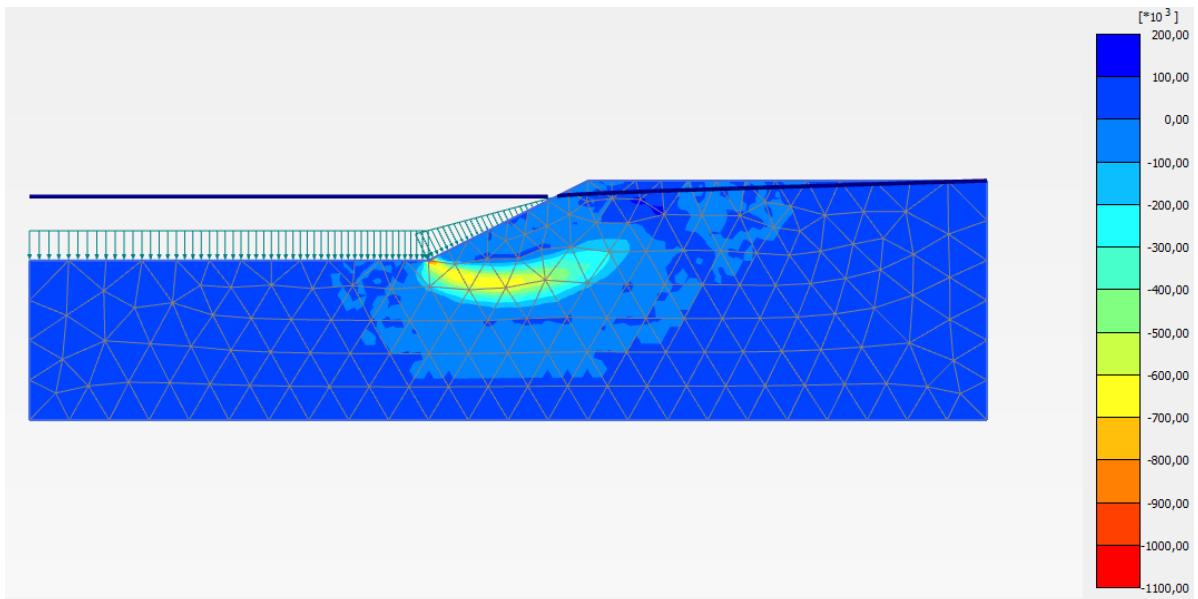
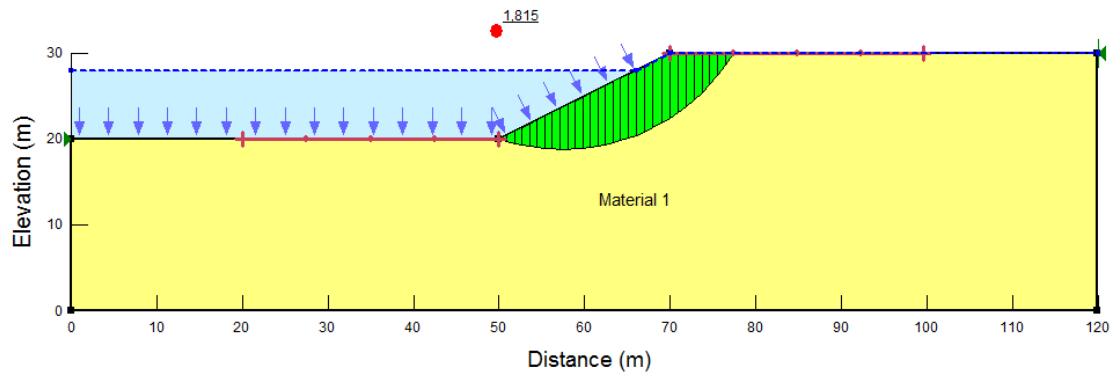


Figura 53 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$.(a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

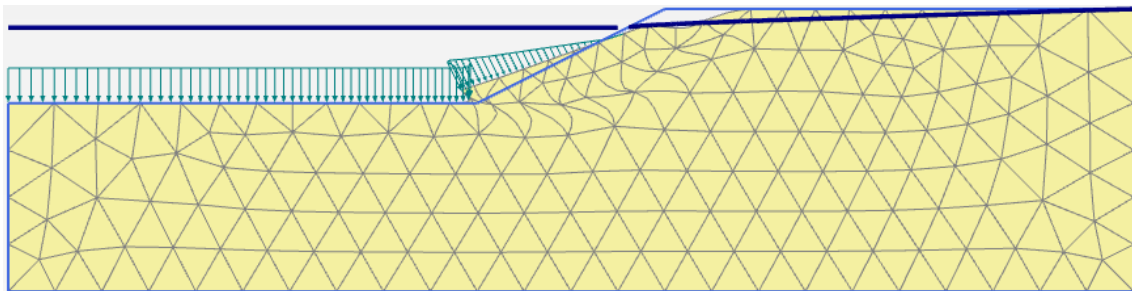
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

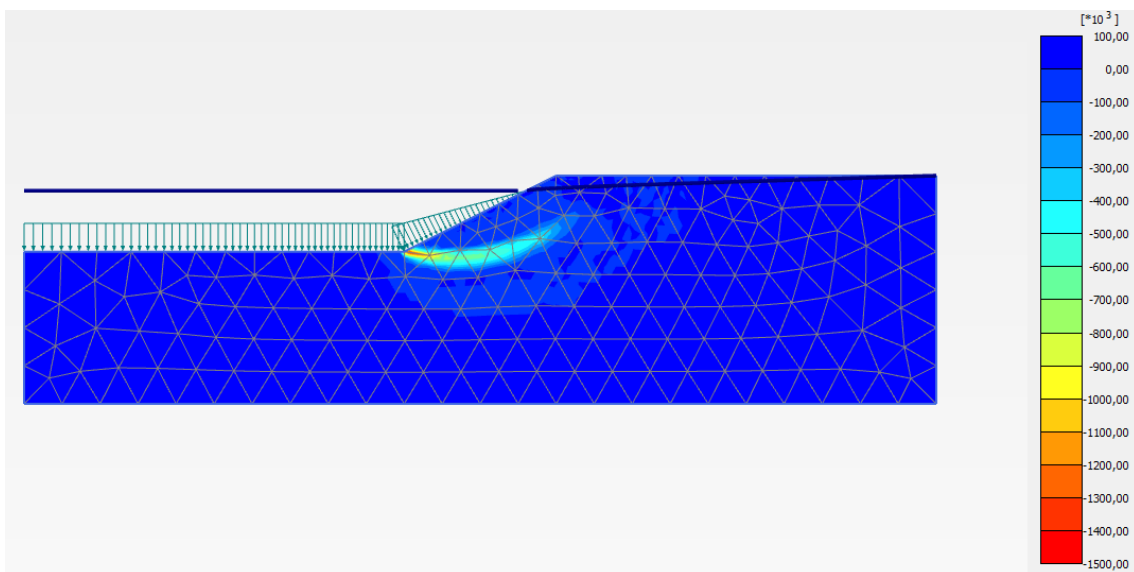
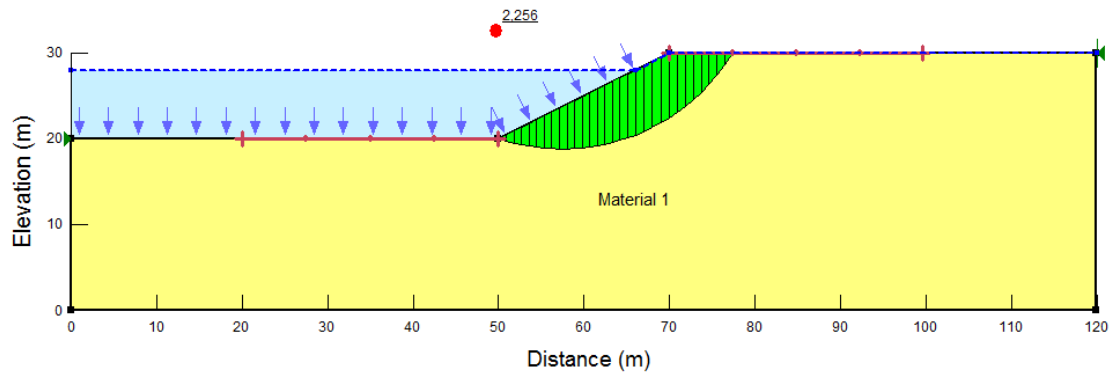


Figura 54 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

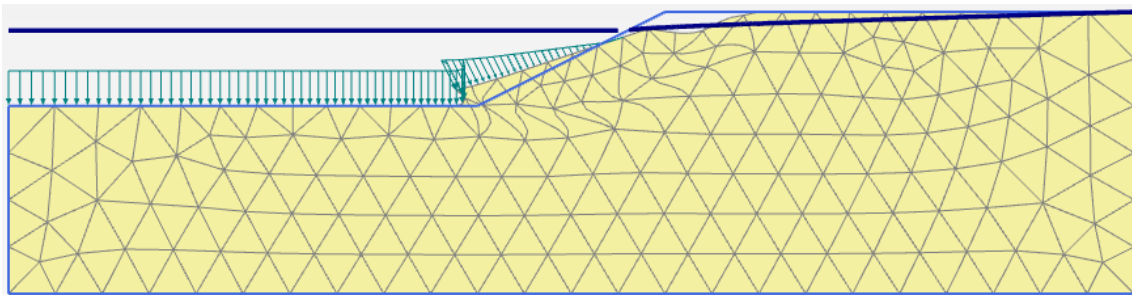
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

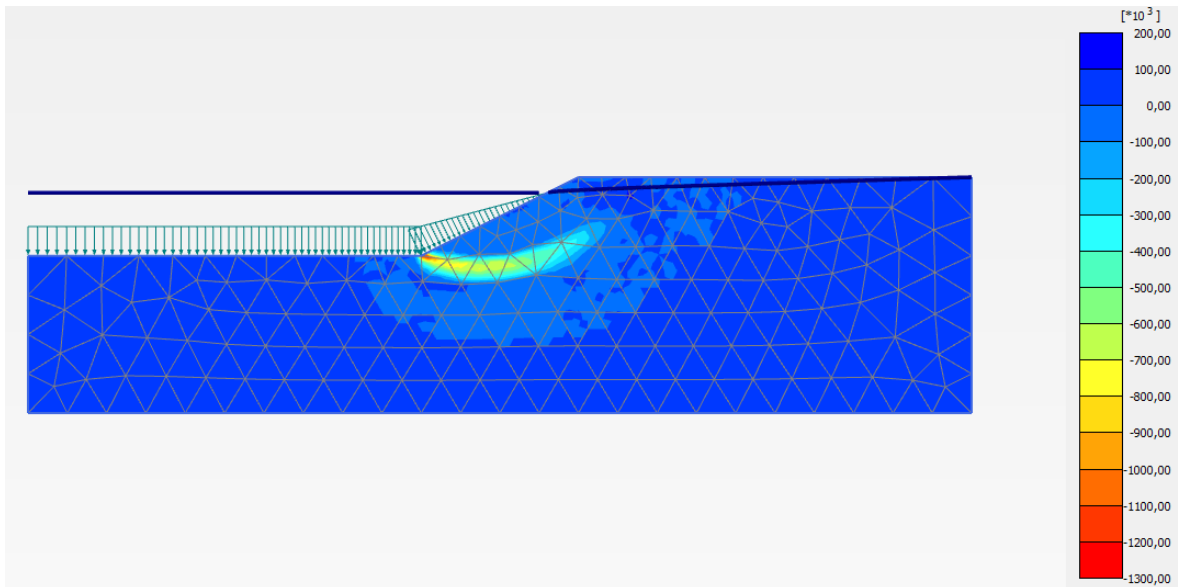
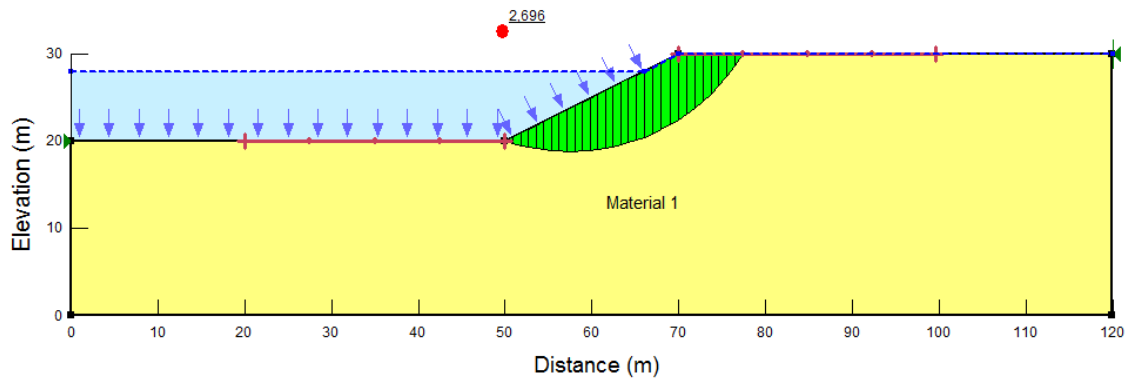


Figura 55 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

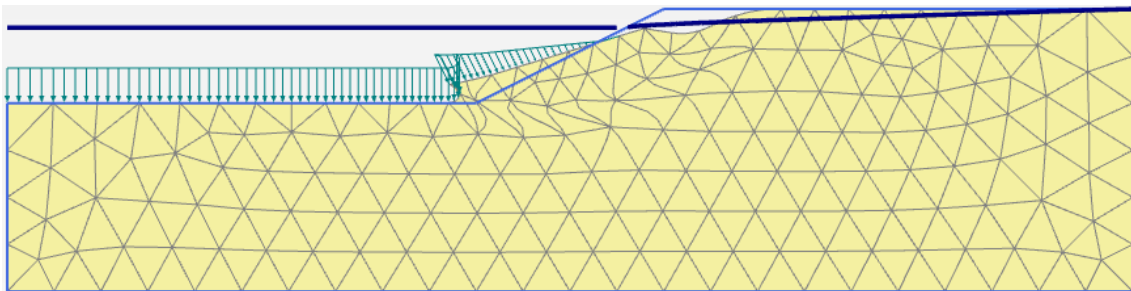
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

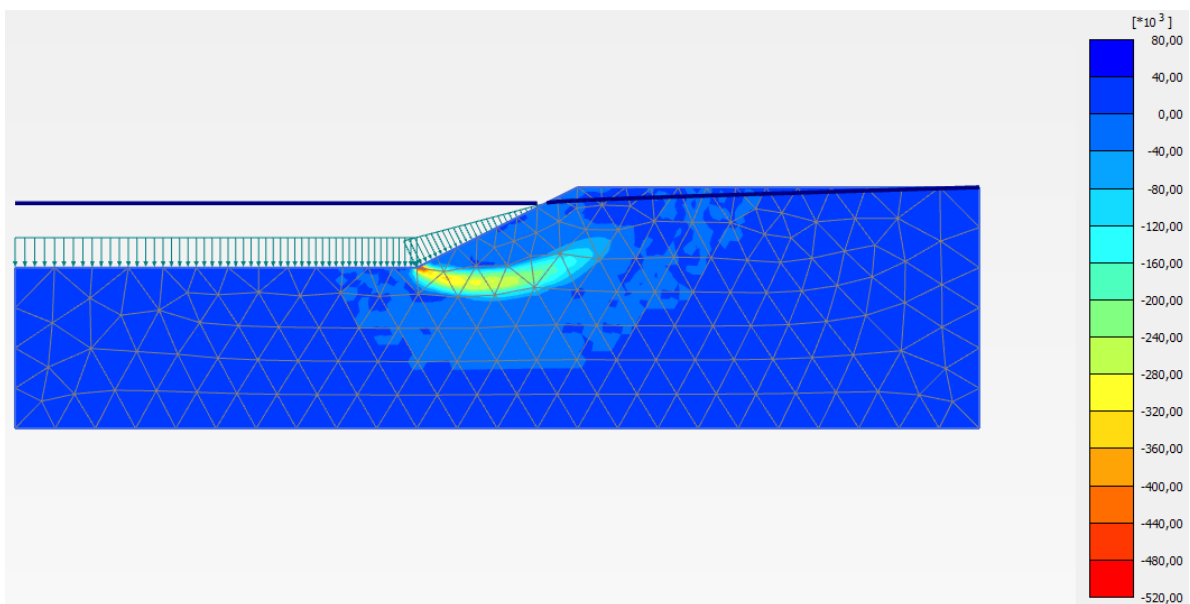
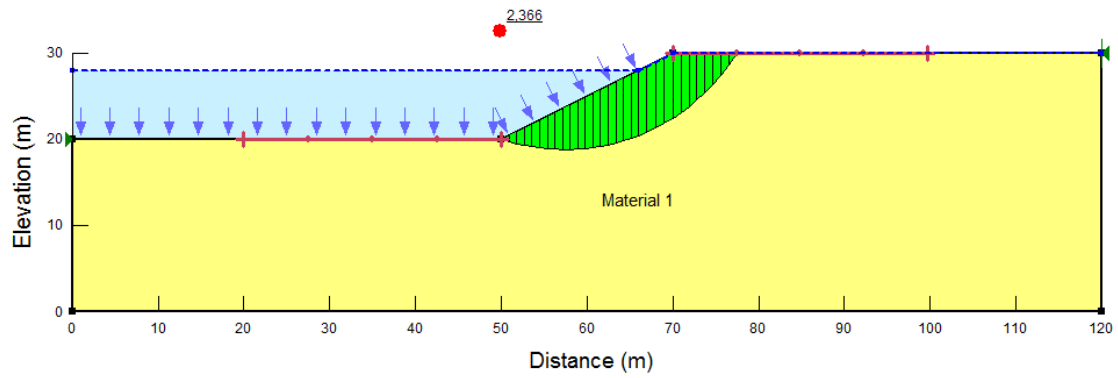


Figura 56 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

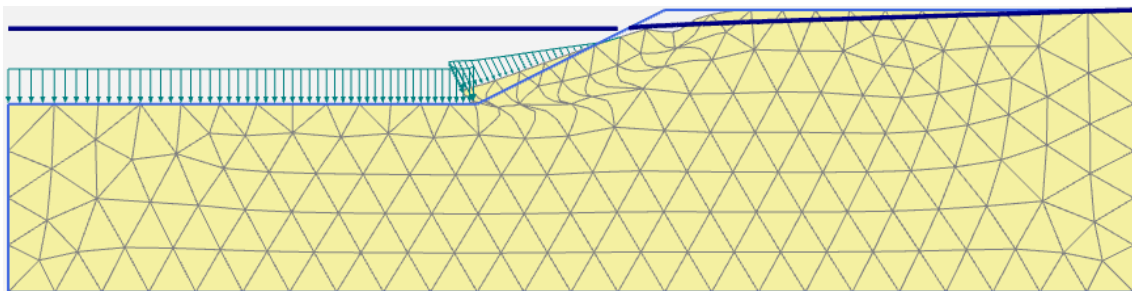
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

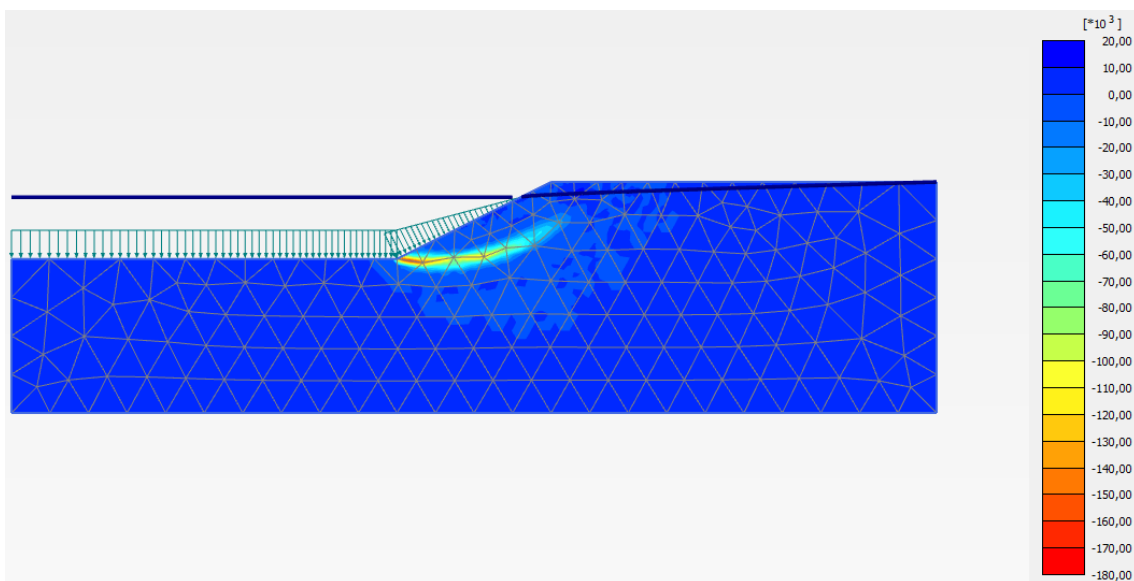
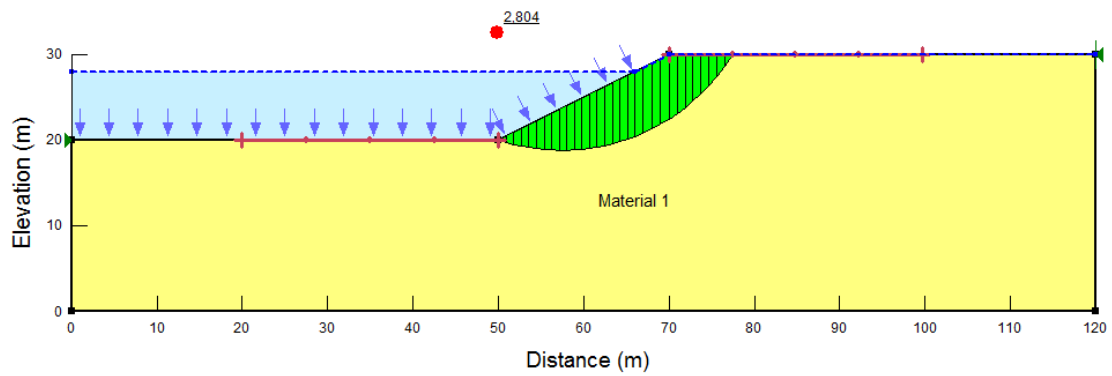


Figura 57 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

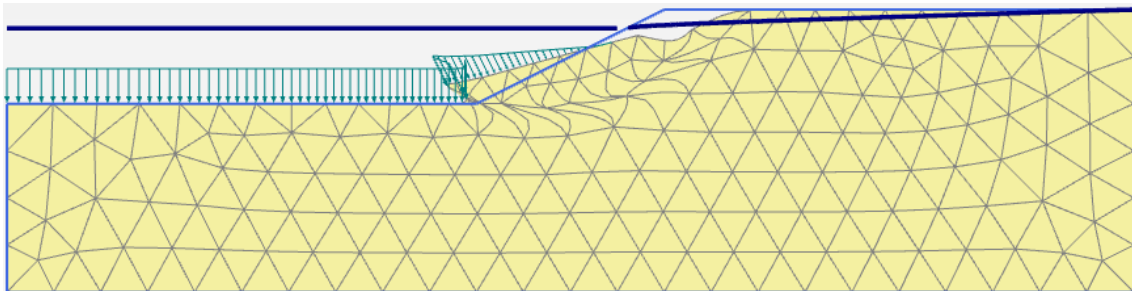
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

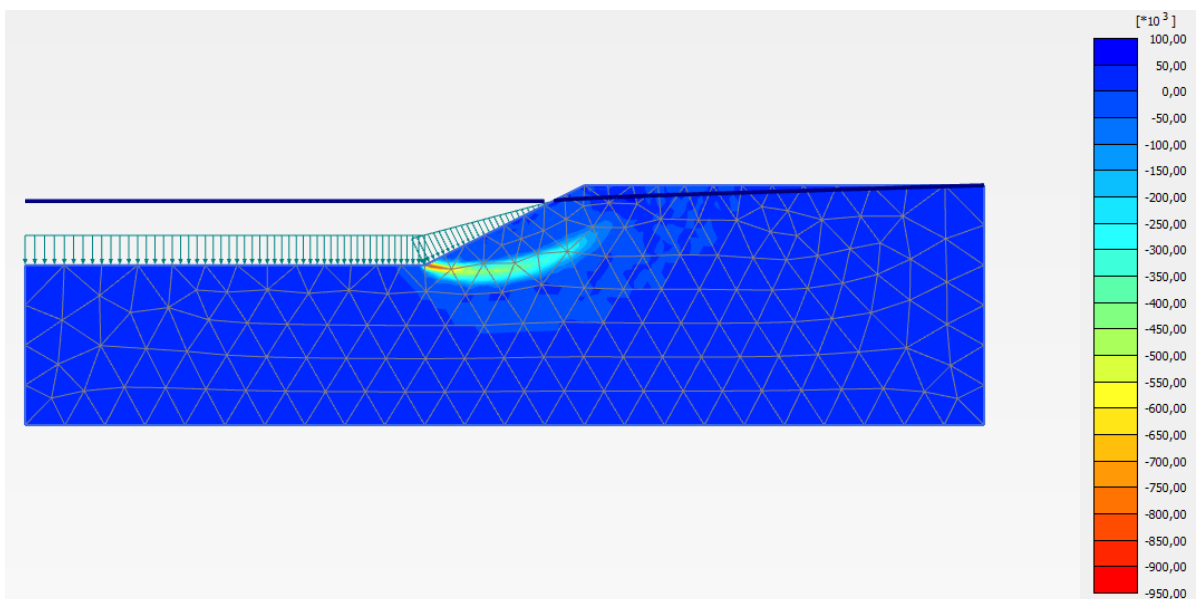
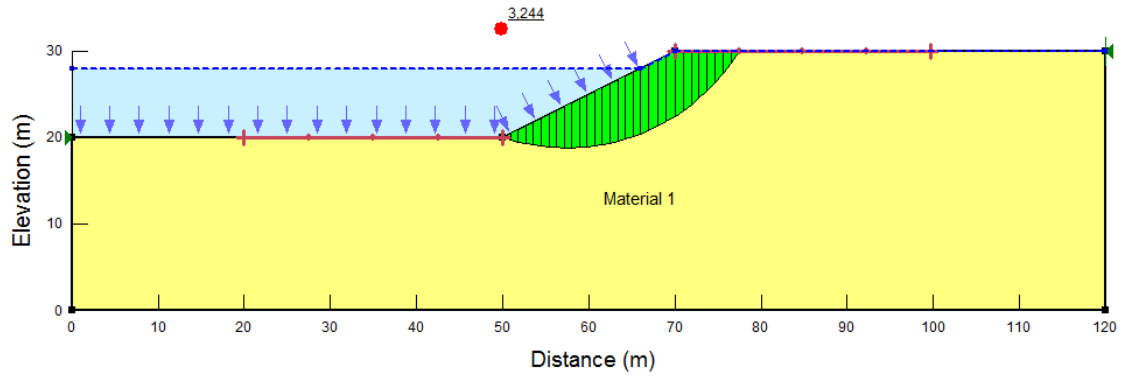


Figura 58 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

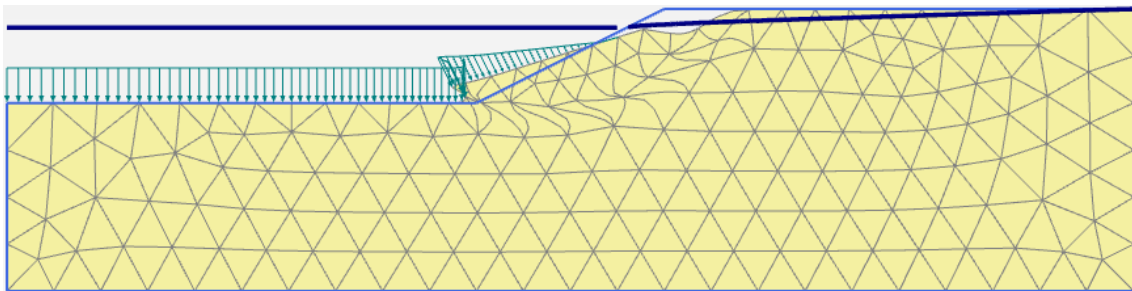
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

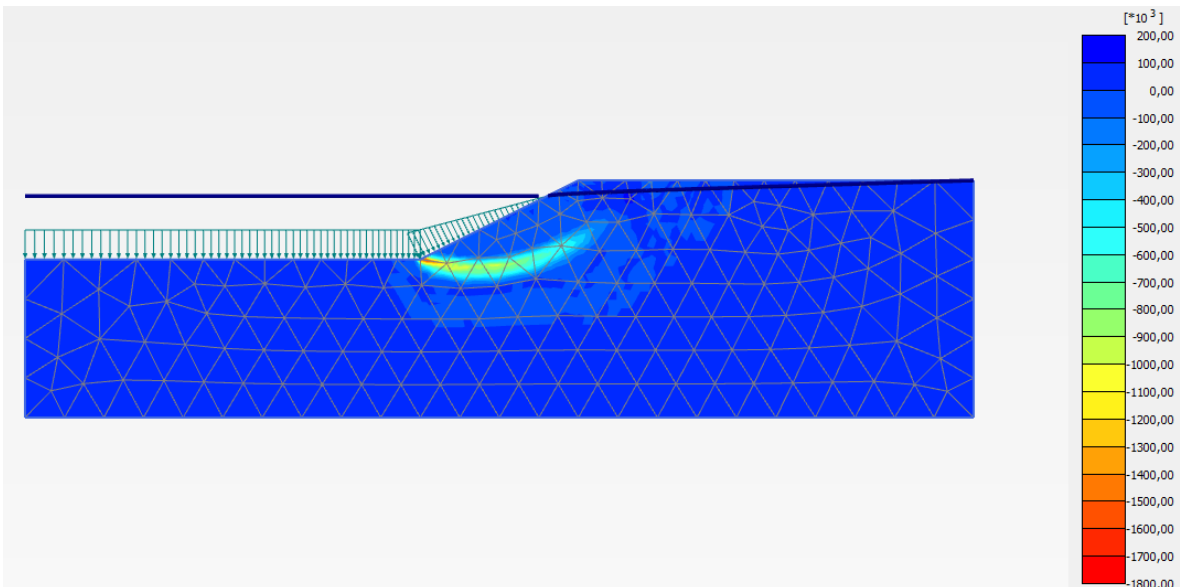
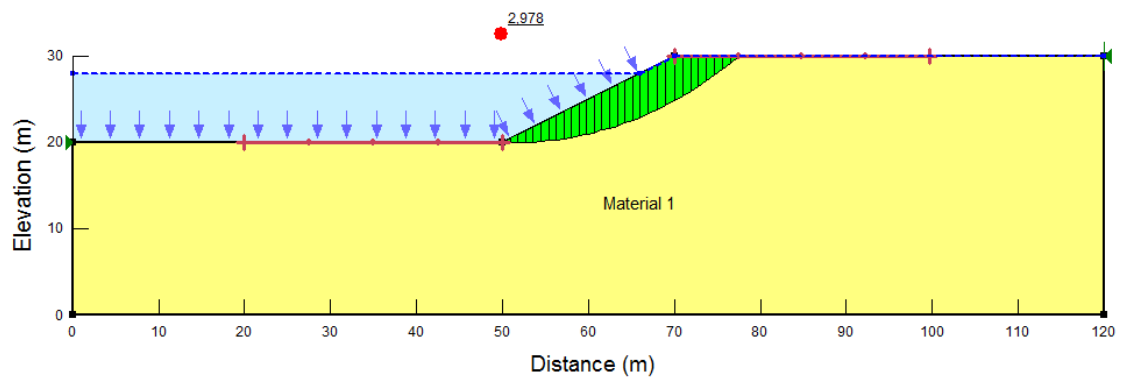


Figura 59 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

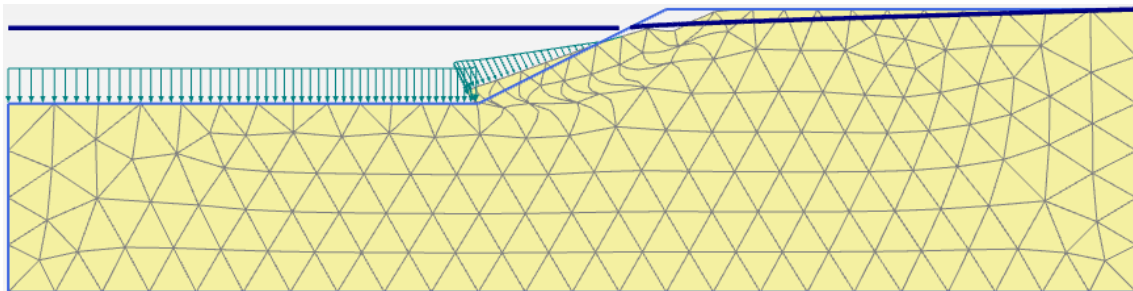
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

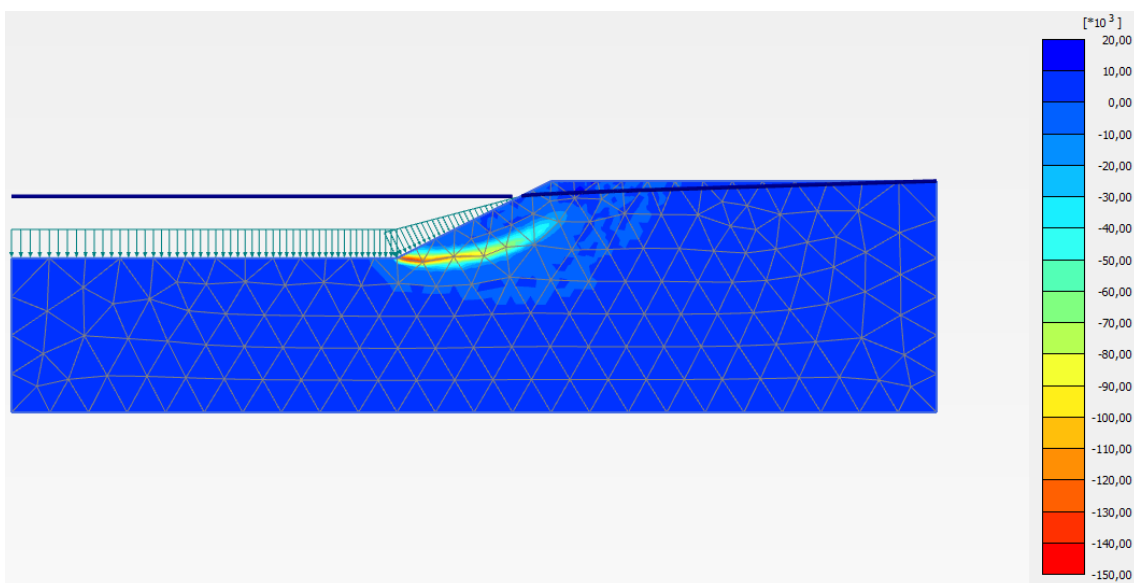
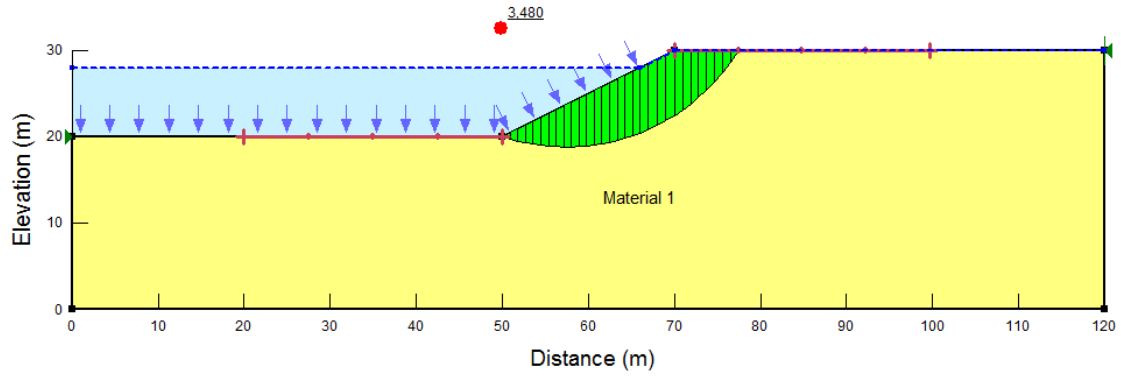


Figura 60 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

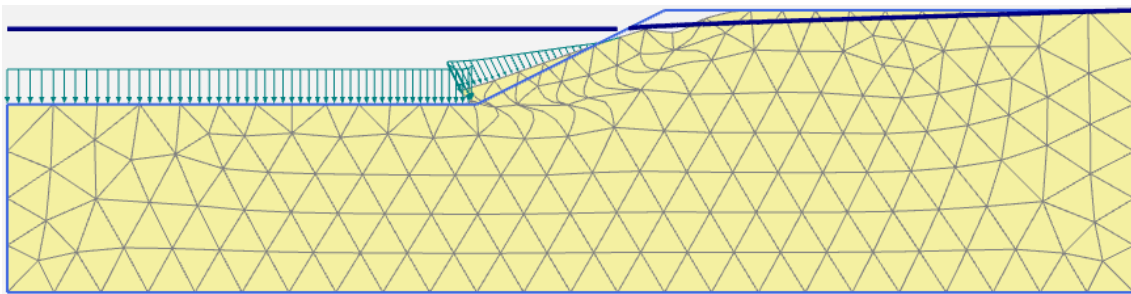
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

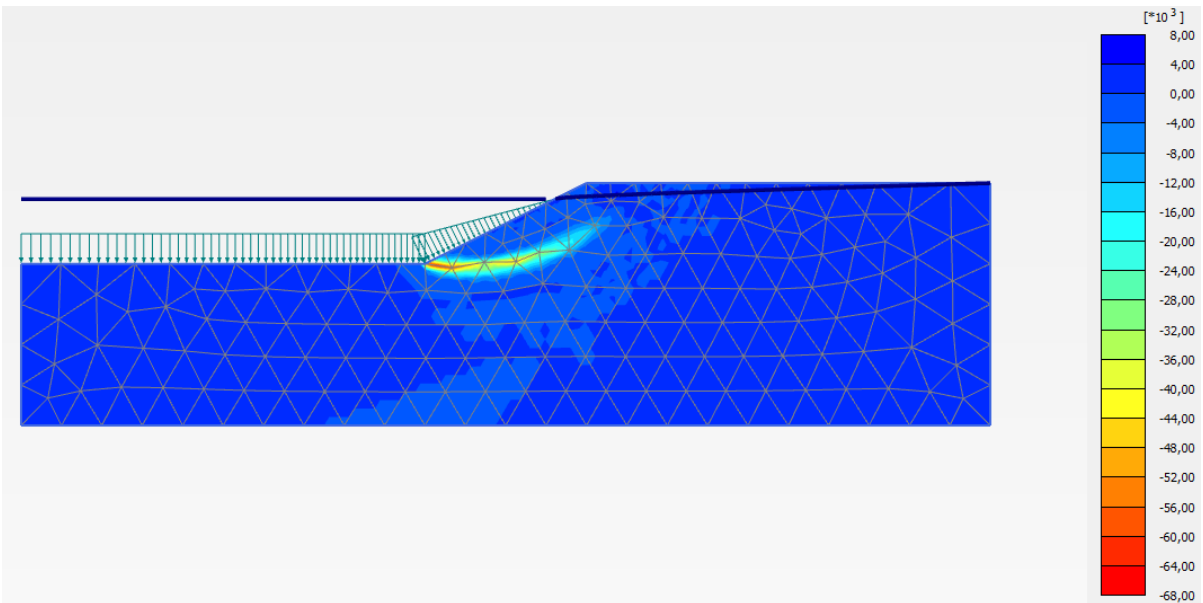
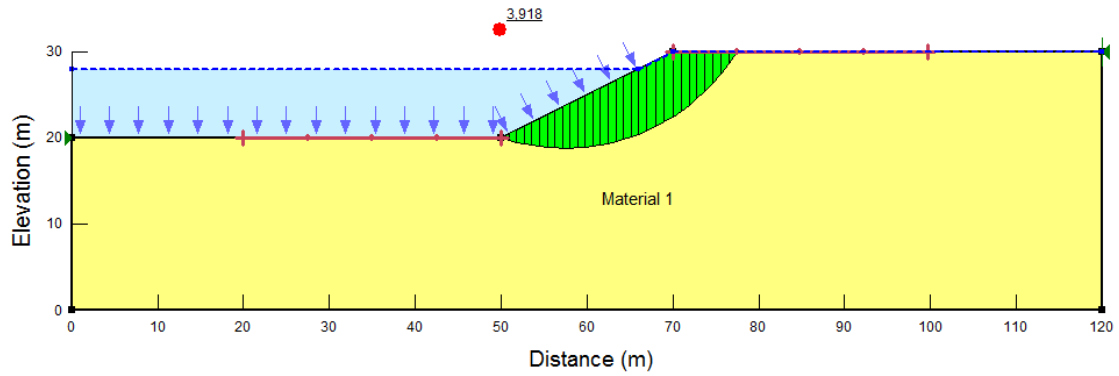


Figura 61 Cas 1. $H=8m$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

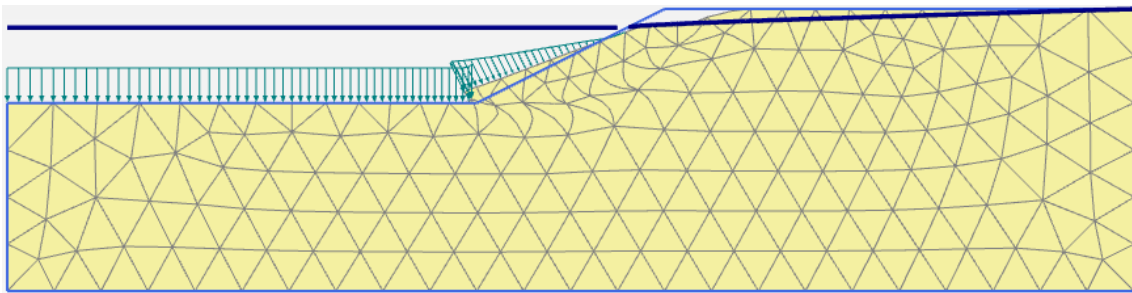
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

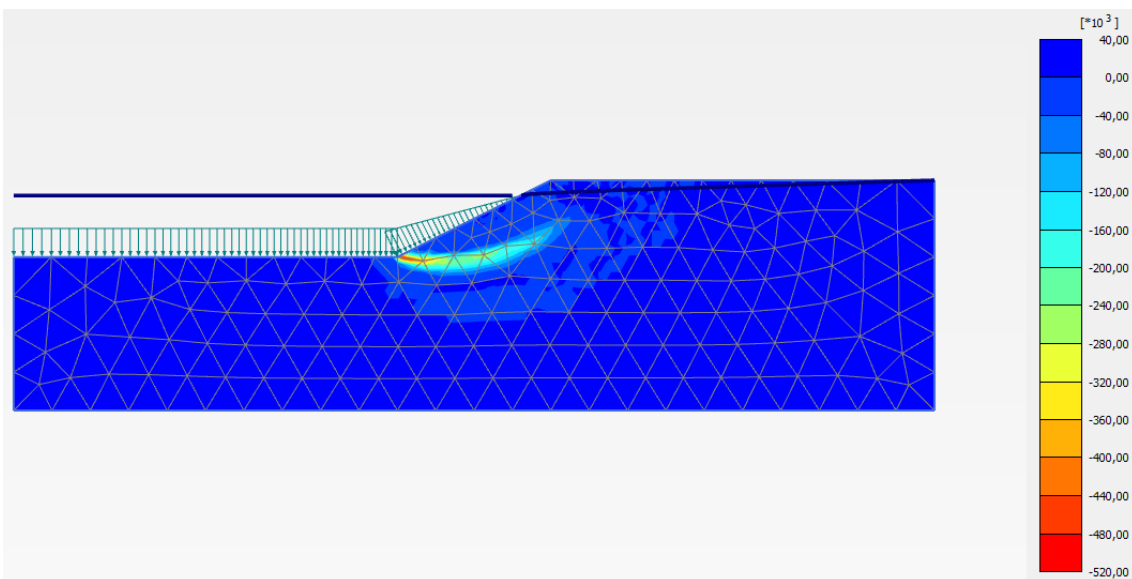
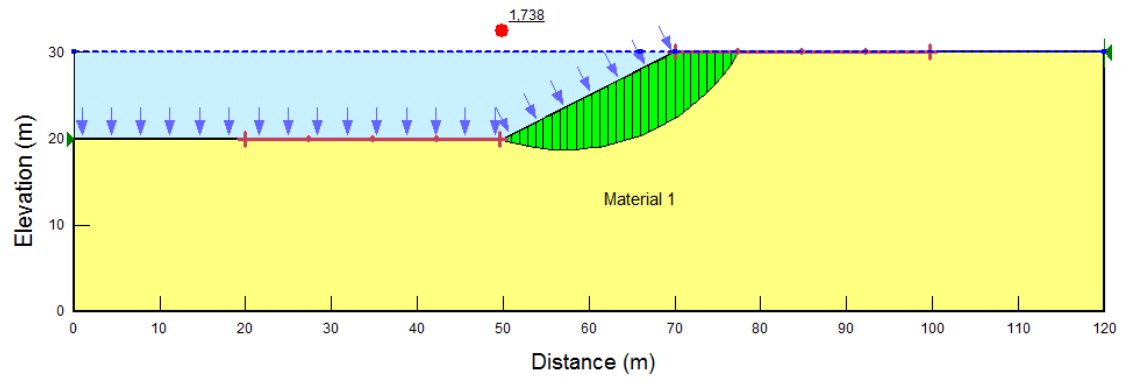


Figura 62 Cas 1. $H=8\text{m}$, $\varphi=40^\circ$ i $c=36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

4.3.3.5 $H_w=10$ metres

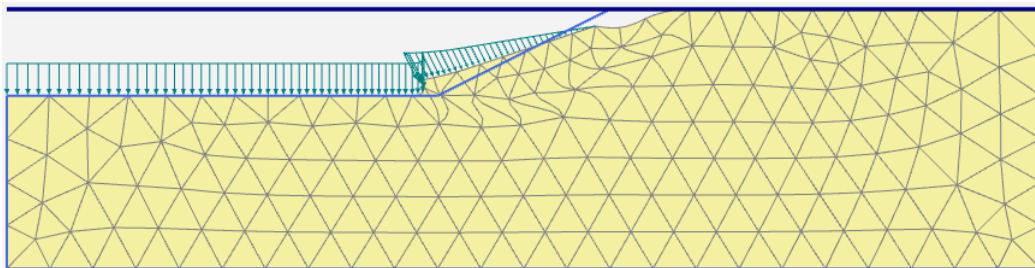
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18$ kPa
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

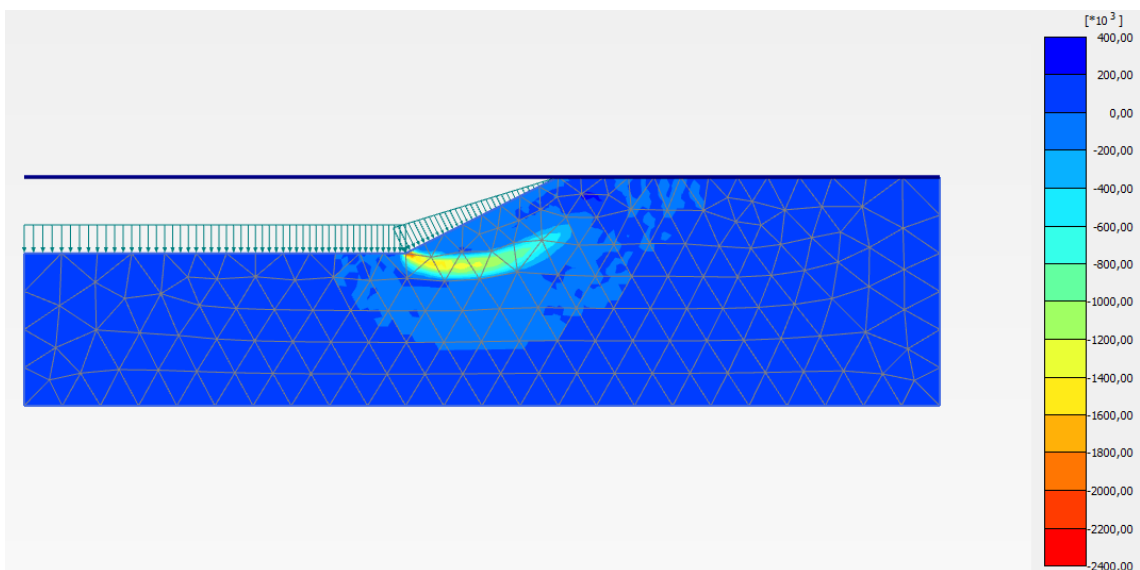
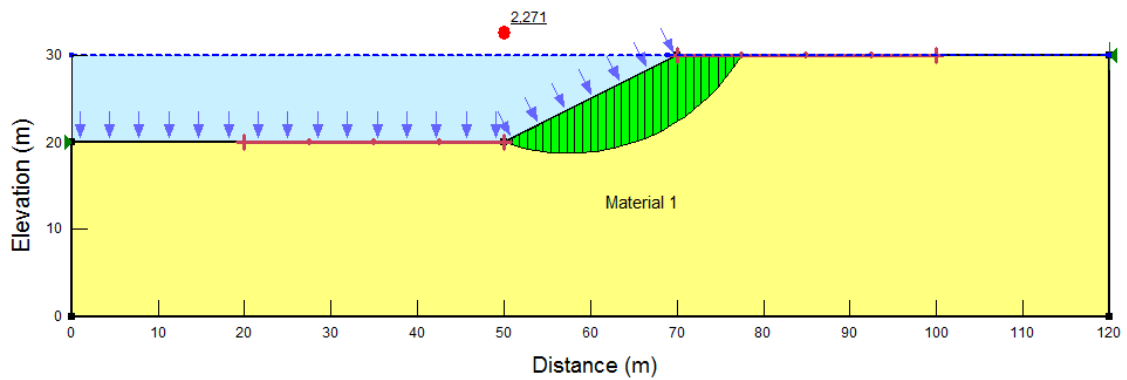


Figura 63 Cas 1. $H=10$ m, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 18$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

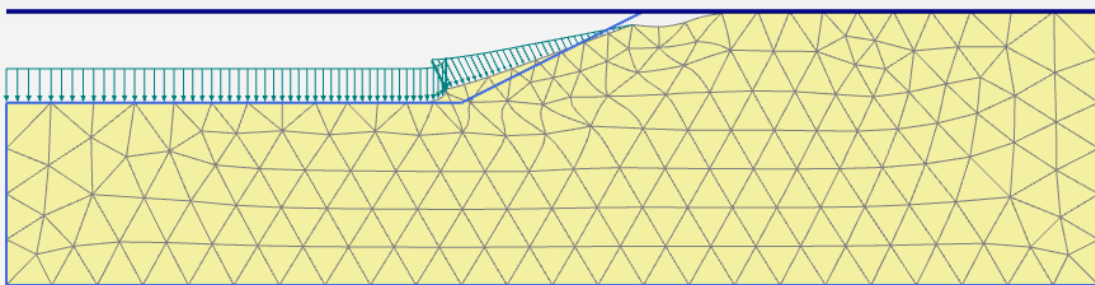
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

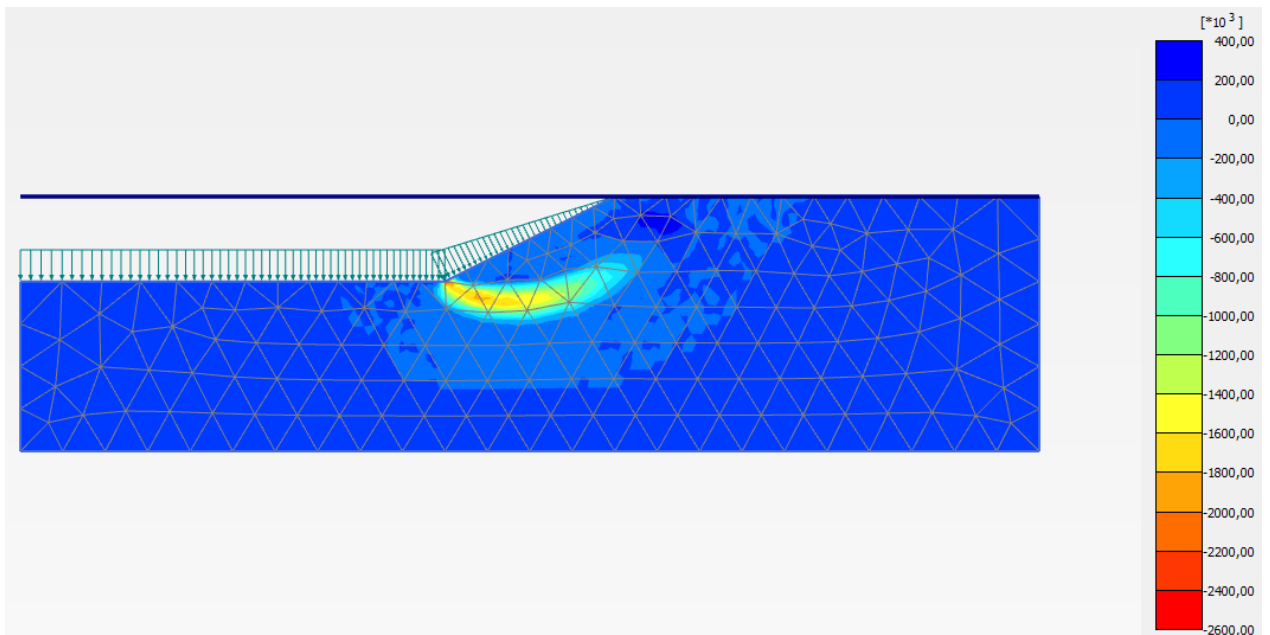
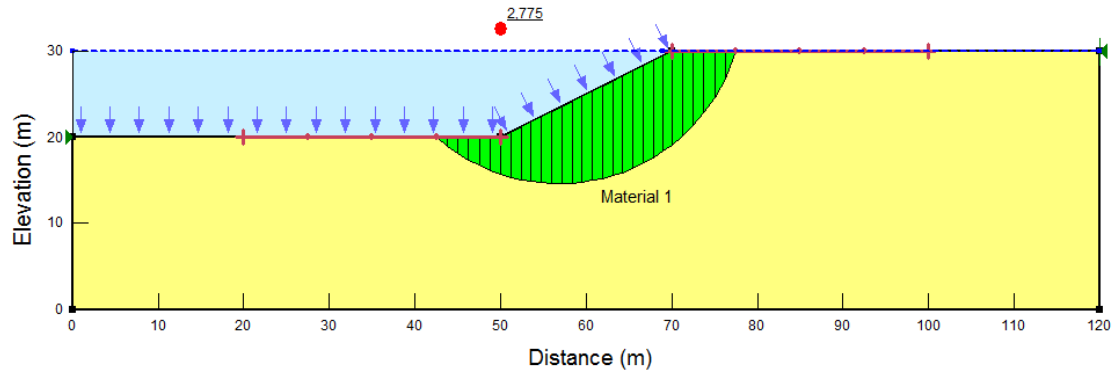


Figura 64 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

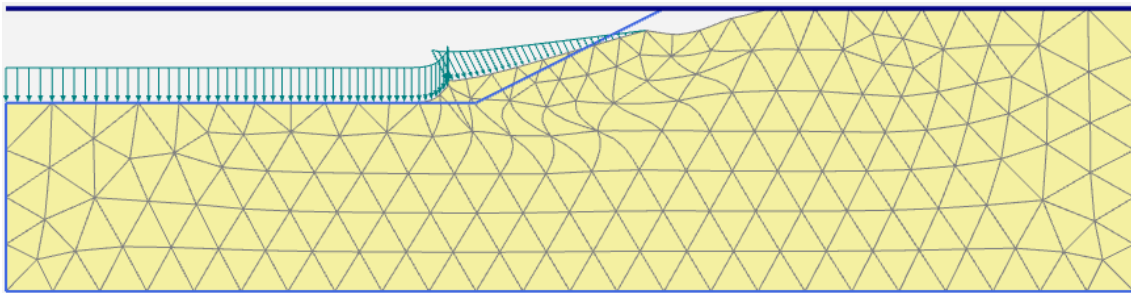
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

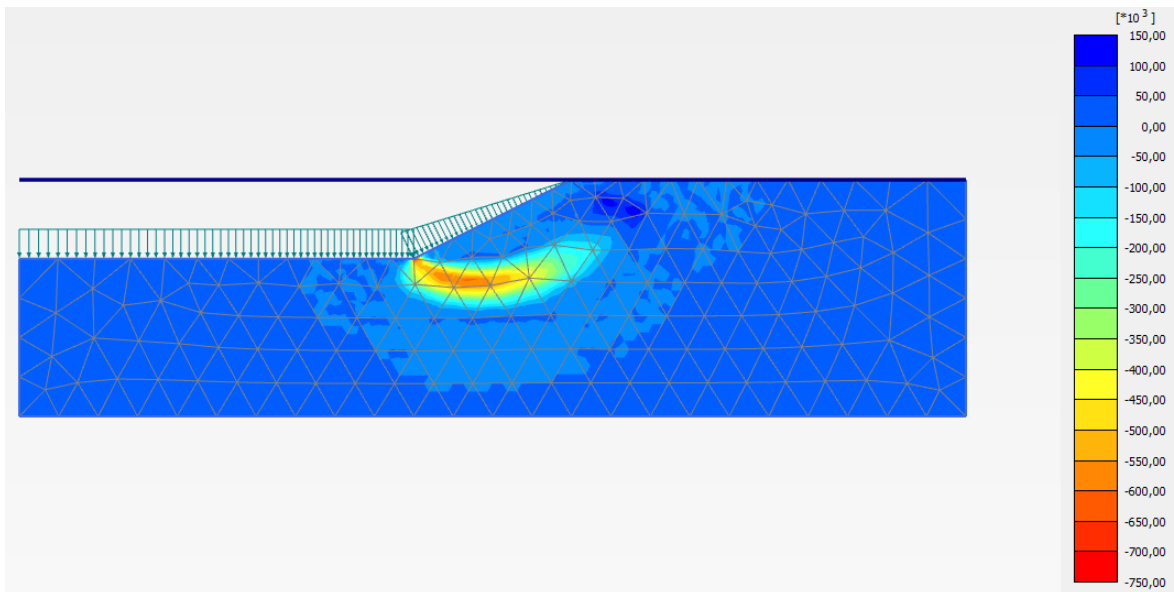
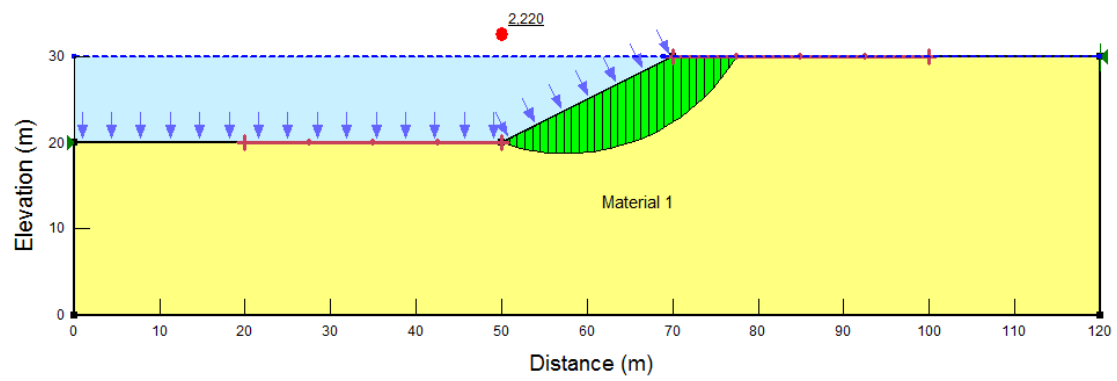


Figura 65 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 12^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

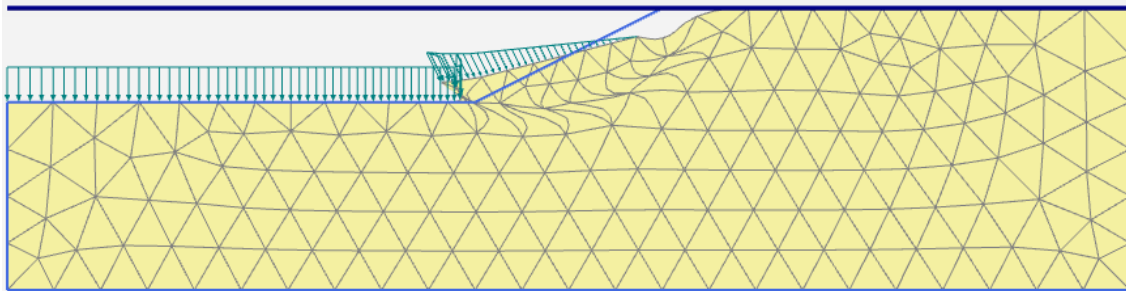
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

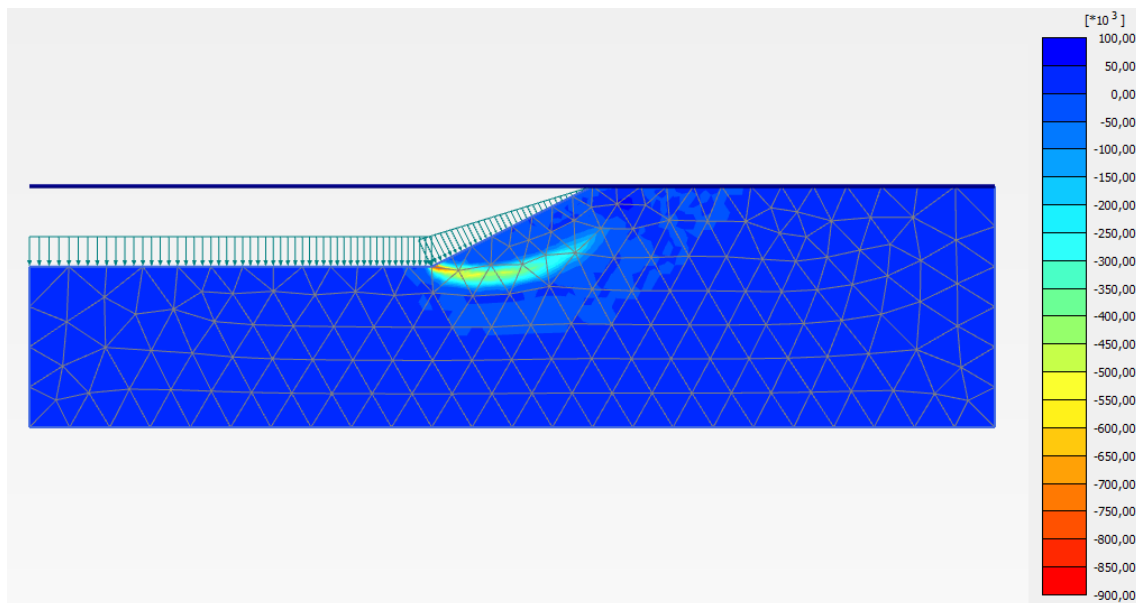
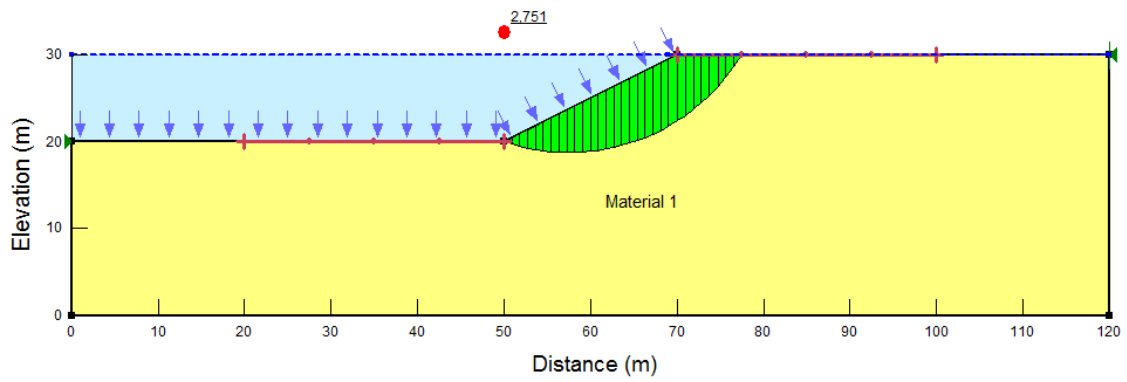


Figura 66 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

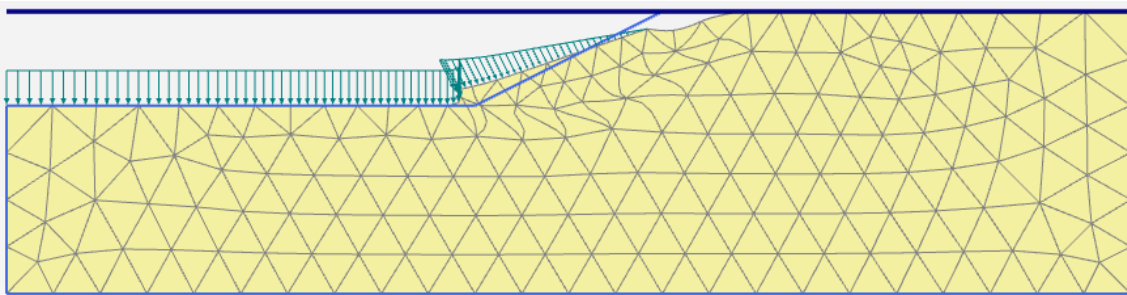
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

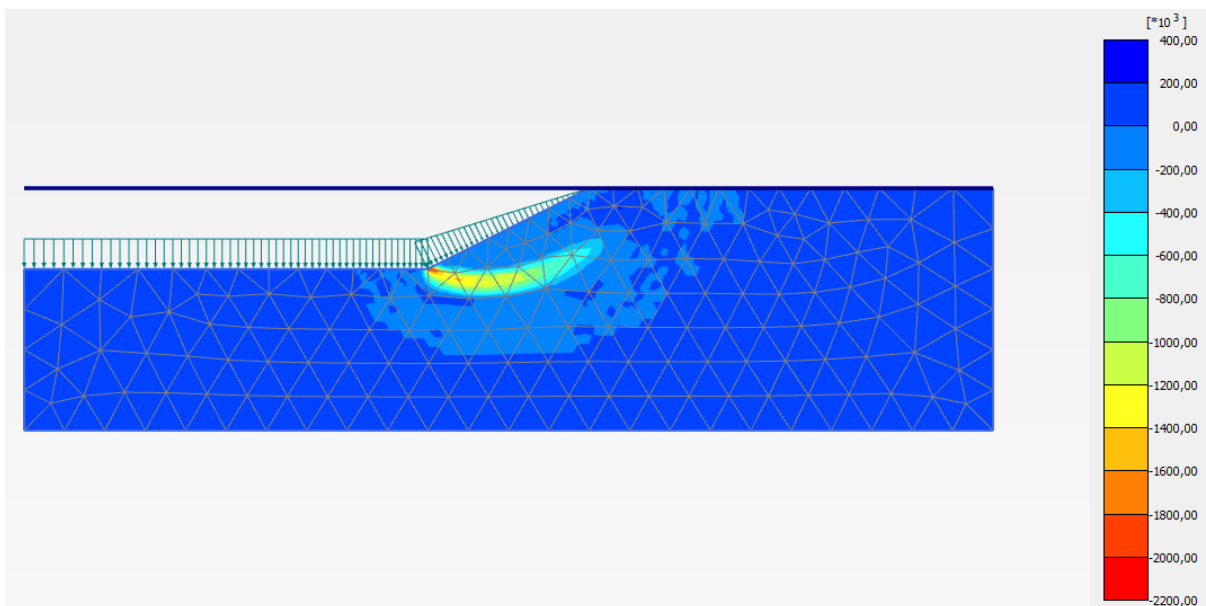
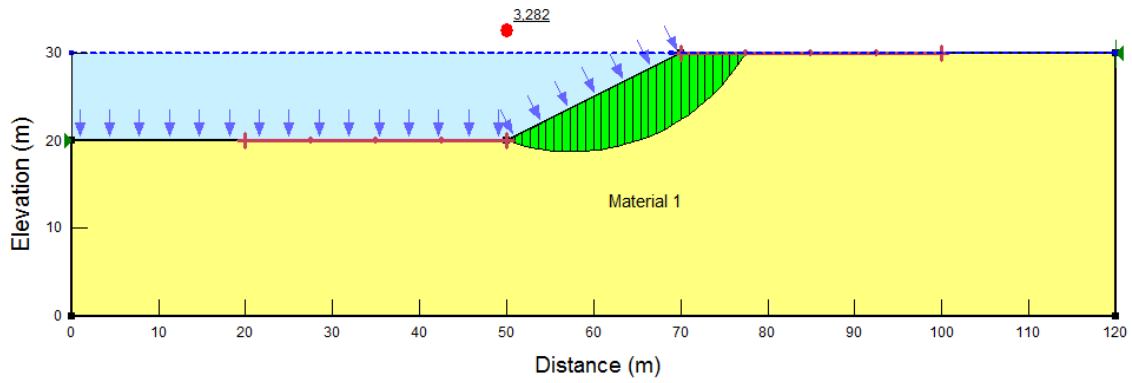


Figura 67 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

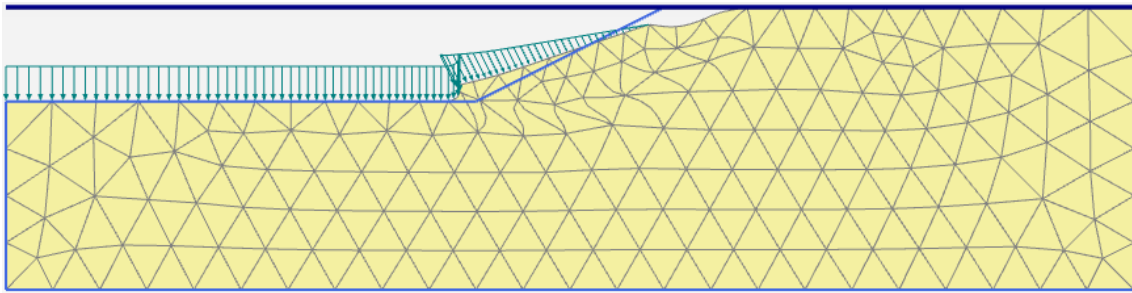
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

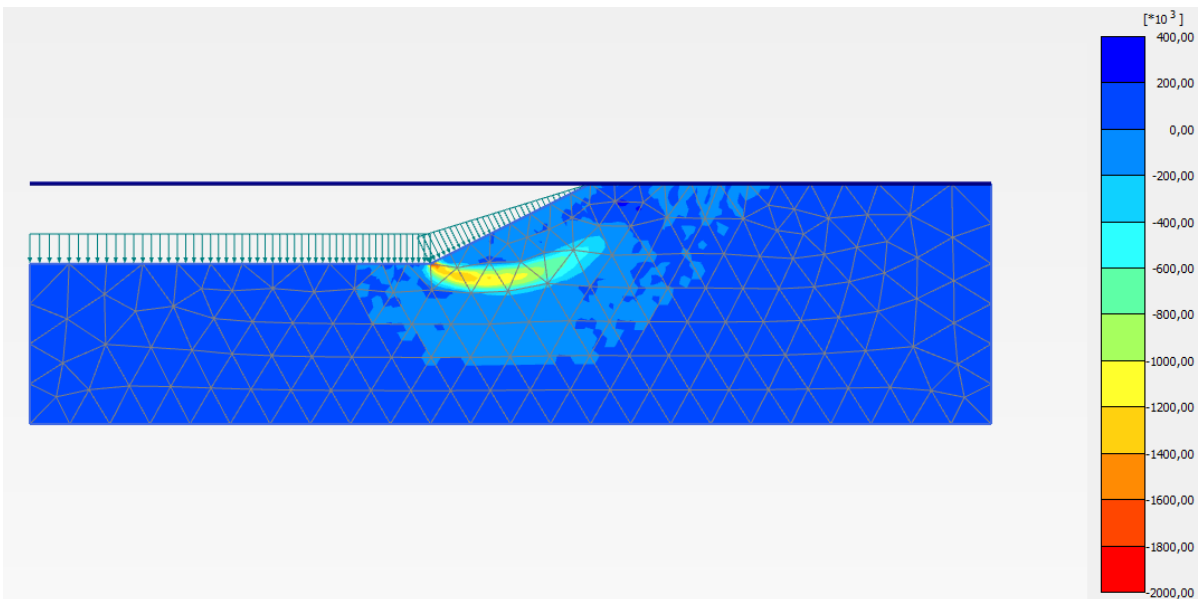
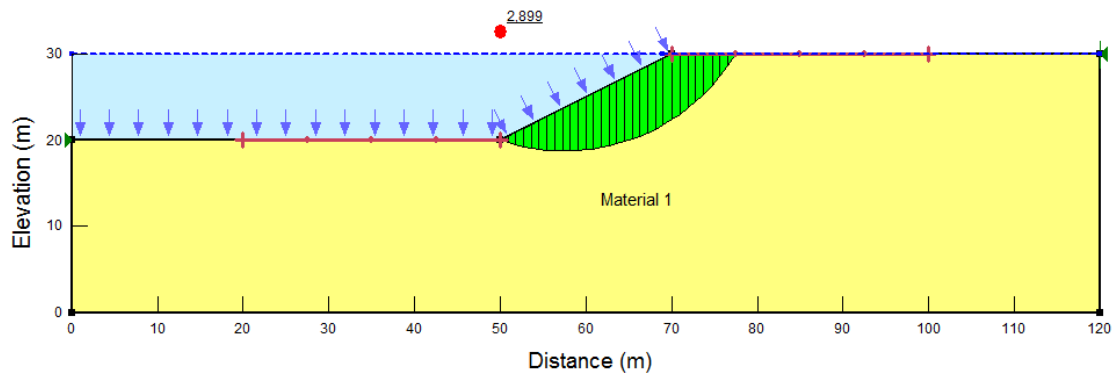


Figura 68 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$ i $c = 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

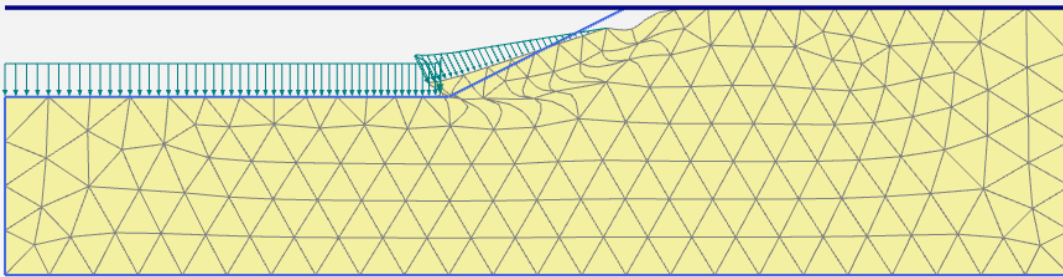
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

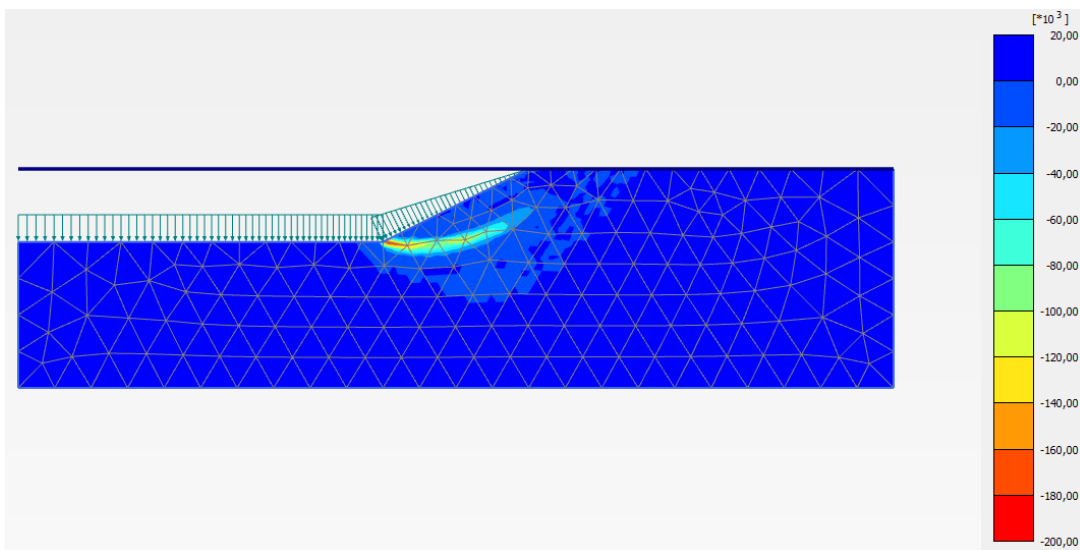
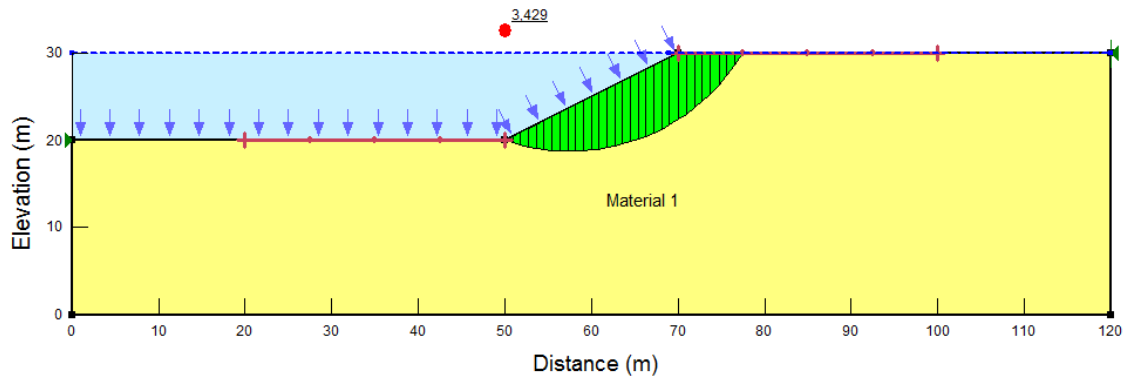


Figura 69 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

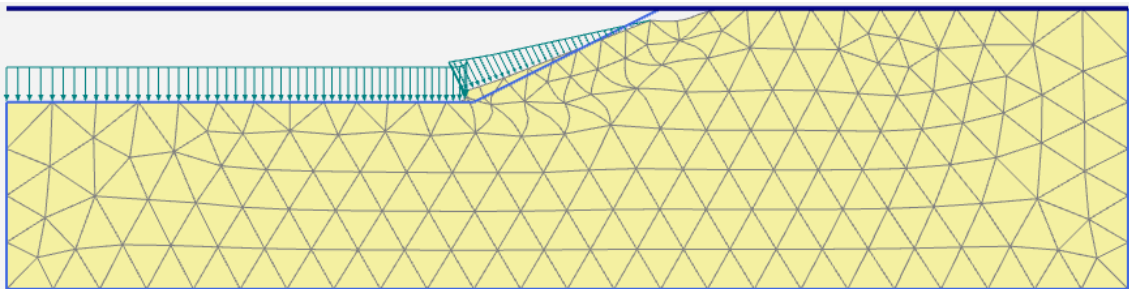
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

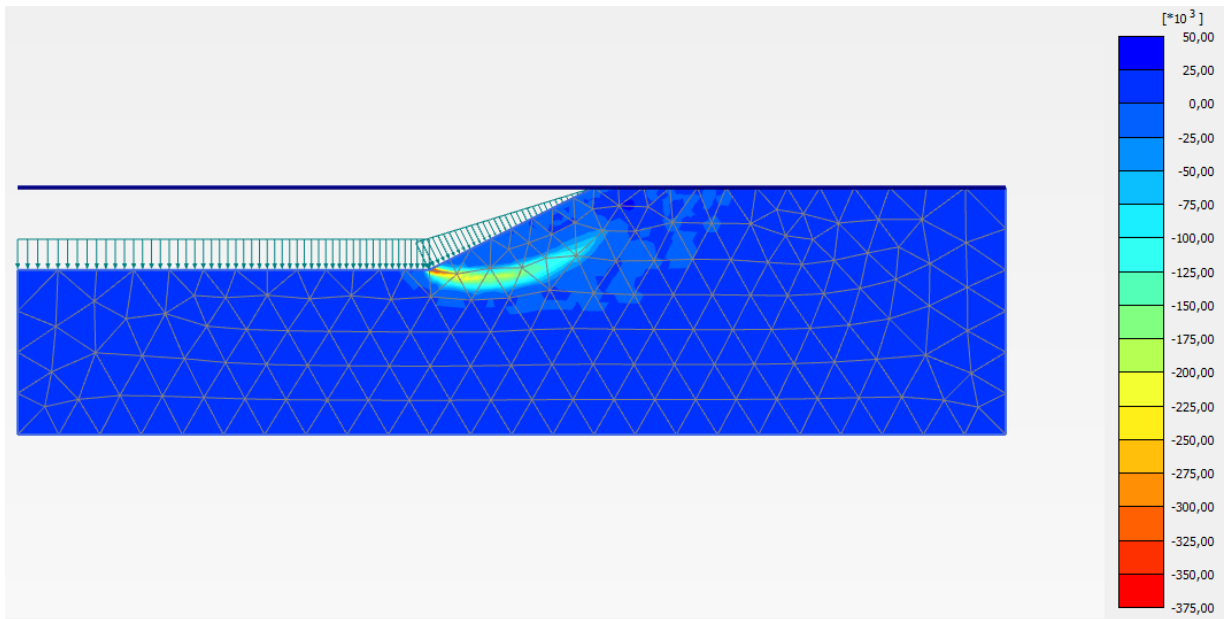
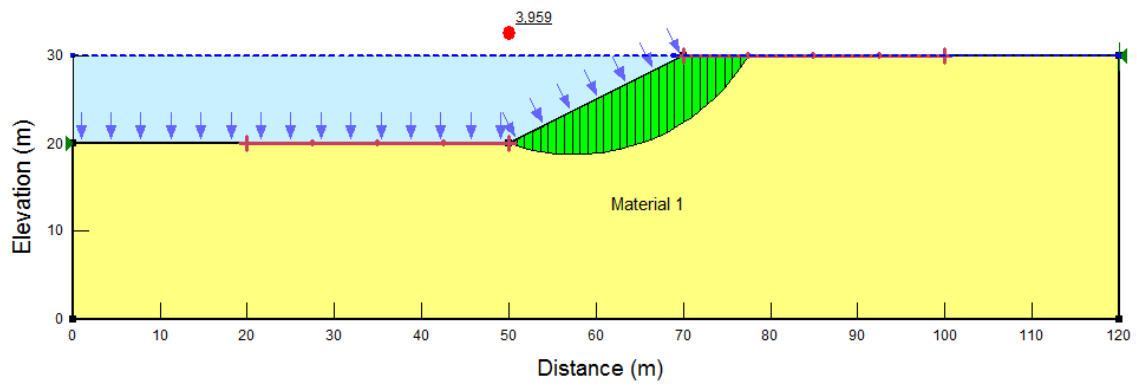


Figura 70 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

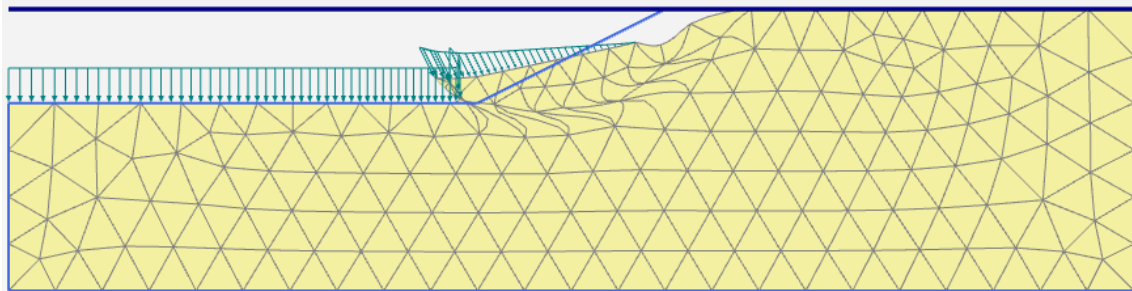
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

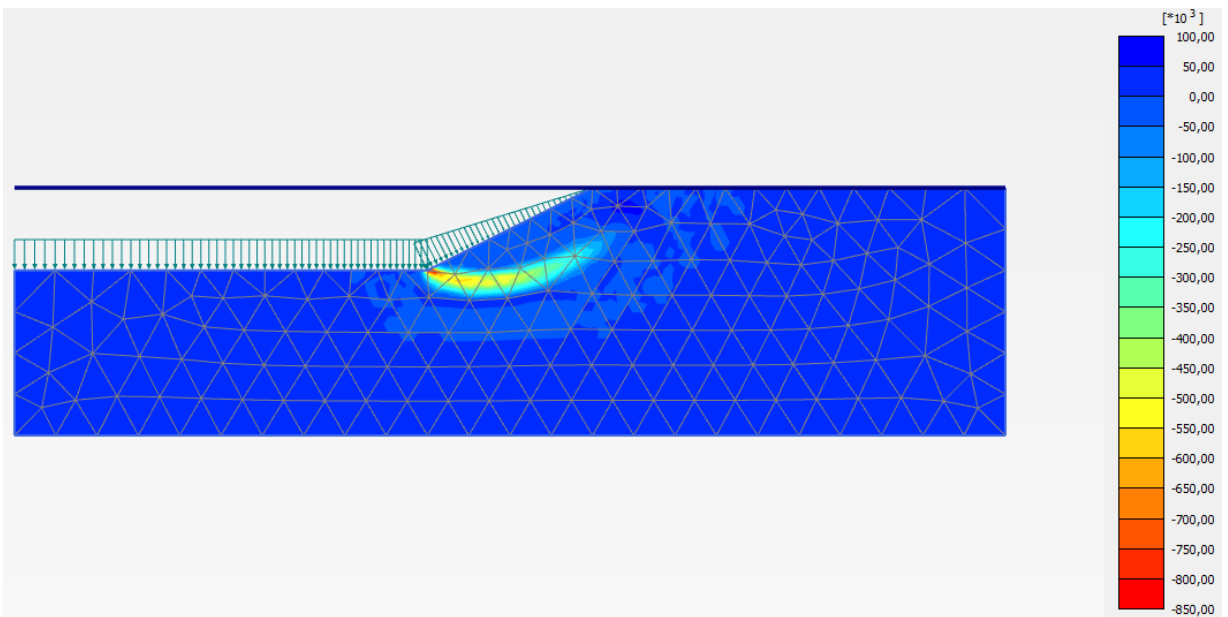
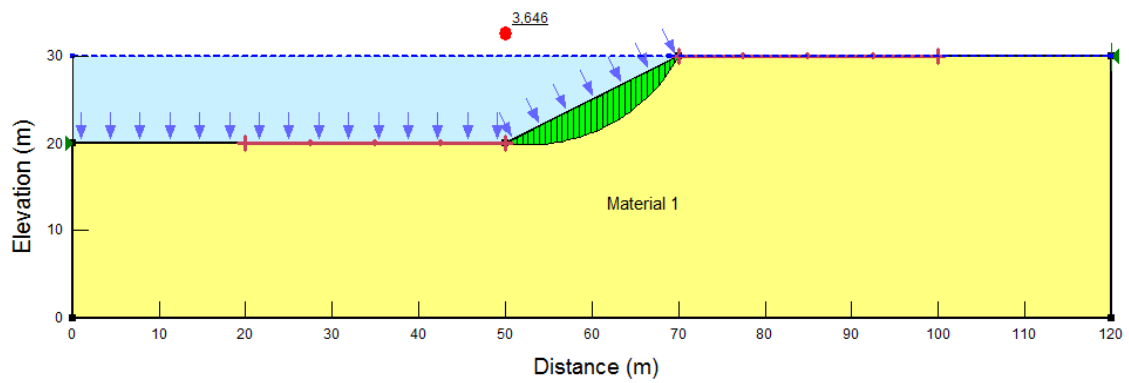


Figura 71 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 30^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

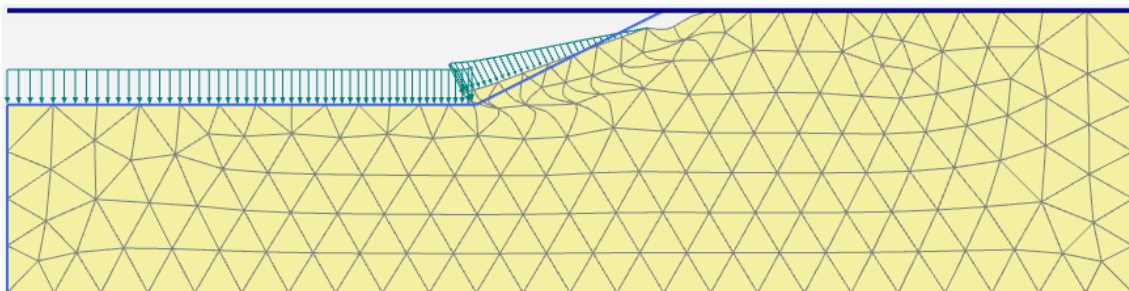
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$
 - ❖ GEO-SLOPE

(a)



❖ PLAXIS

(b)



(c)

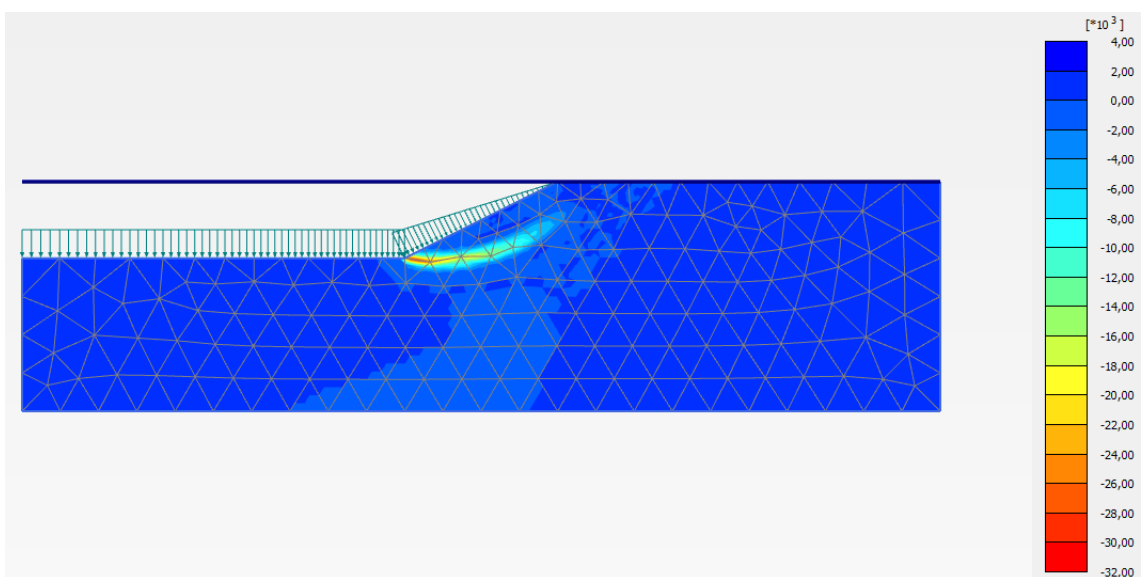
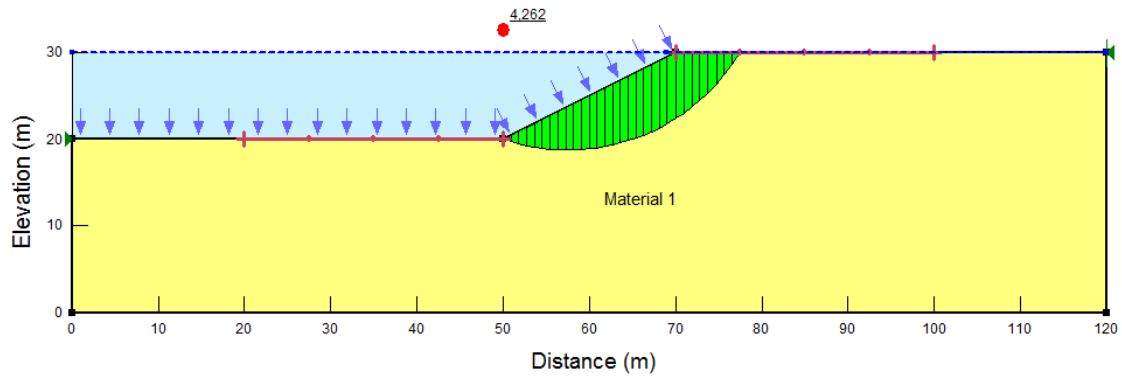


Figura 72 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 18 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

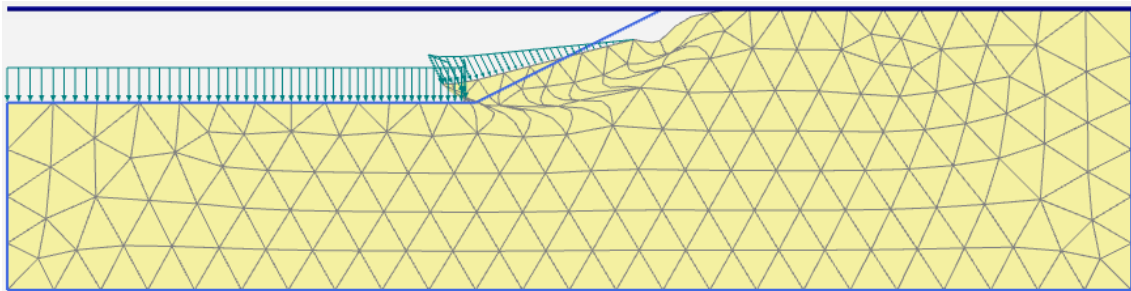
- $c = 27 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

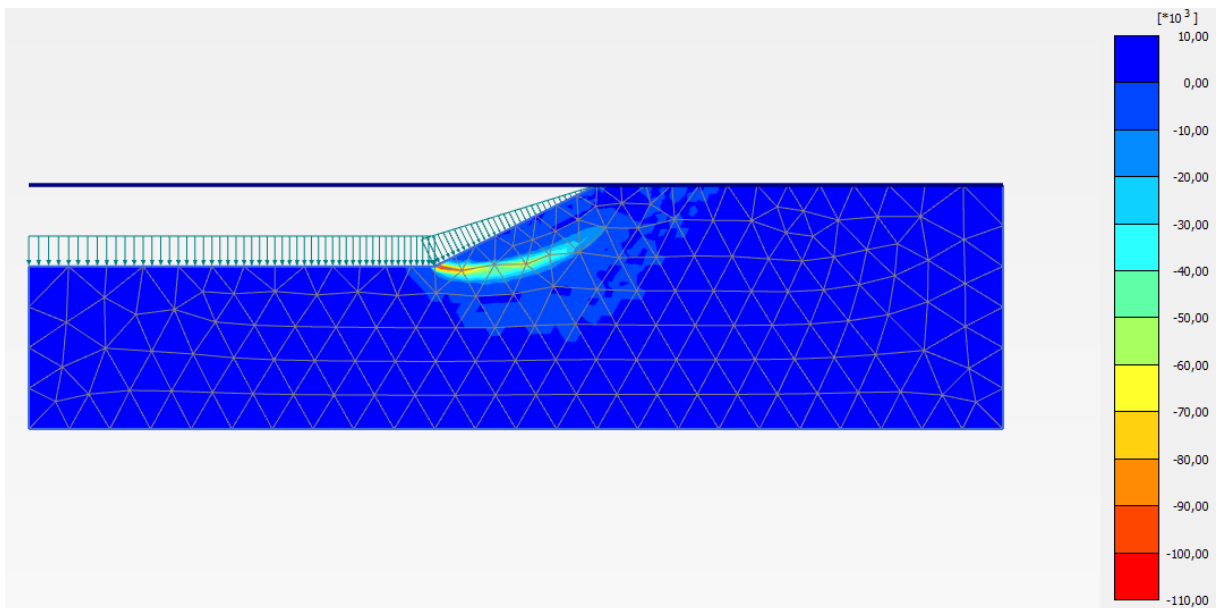
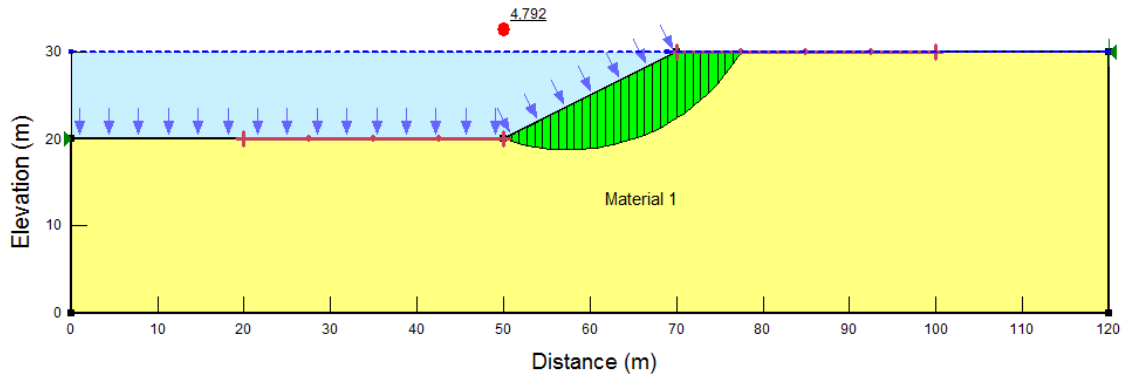


Figura 73 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 27 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

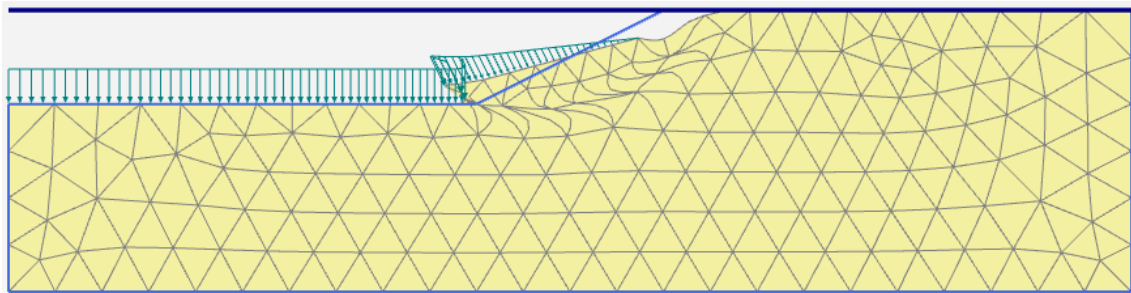
- $c = 36 \text{ kPa}$
- ❖ GEO-SLOPE

(a)



- ❖ PLAXIS

(b)



(c)

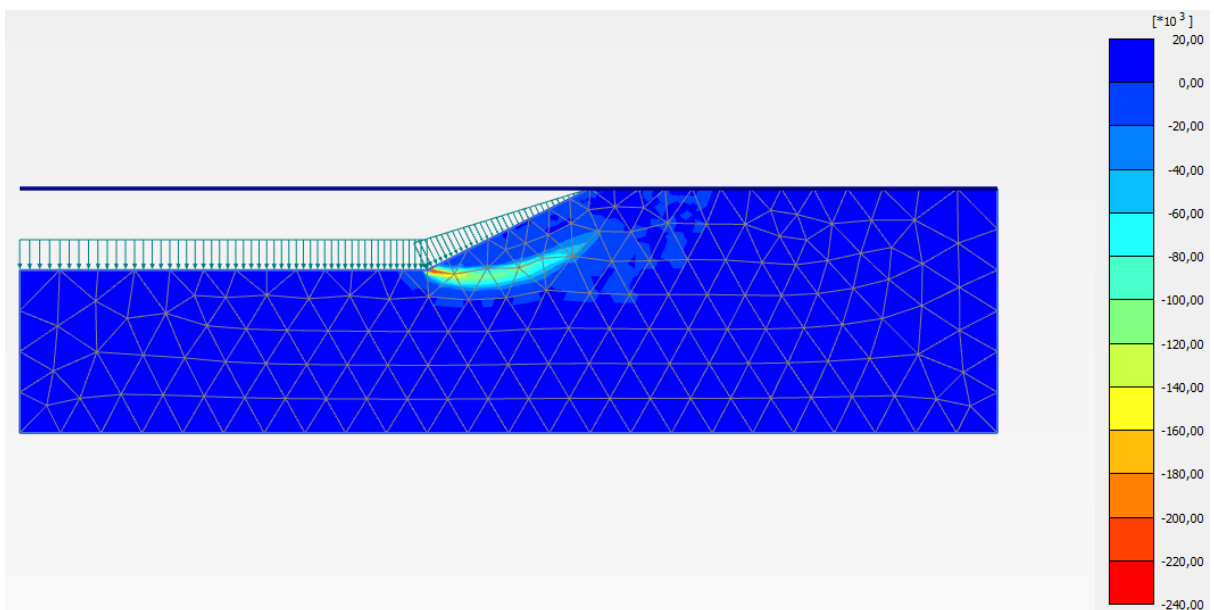


Figura 74 Cas 1. $H=10\text{m}$, $\varphi = 40^\circ$ i $c= 36 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

4.4 CAS 2: SÒLS ARGILLOSOS SECS

Per aquest segon cas hem volgut reproduir com afecten les argiles quan estan seques en l'estabilitat d'un talús. Partim, d'una estructura que està formada per dos argiles (argila 1 i argila 2) de les quals s'anirà variant el valor de les cohesions. La relació entre els dos valors de cohesió de cadascuna de les argiles és en el que ens hem basat per trobar un número de cassos acceptables alhora de realitzar l'estudi (C2/C1). Seguint amb l'esquema que hem utilitzat en el primer cas, els valors dels paràmetres del terreny s'han obtingut en funció de el valor de l'alçada del talús (H=5 metres) i del valor del pes específic , que en aquest cas hem definit que fos el mateix ($\gamma_{unsat} = 18 \text{ KN/m}^2$).

La relació per trobar els valor de cohesió de la argila 1 és la següent:

$$c = H \cdot \alpha \cdot \gamma_{unsat} \quad \text{Eq. 48}$$

Les dues taules que tenim a continuació observem tots els valors de cohesió que hem utilitzat per cadascun dels cassos. El total de combinacions que obtenim per aquest cas 2 són 24 per cadascun dels programes.

Taula 4 Valors de cohesió de l'argila 1 depenen del valor α

α	C1[kpa]
0,15	13,5
0,2	18
0,25	22,5
0,3	27

Taula 5 Valors de la cohesió de l'argila 2 depenent de la relació amb l'argila 1

C1	C2/C1	0,5	1	1,5	2	2,5	3
13,5	Valors de C2	6,75	13,5	20,25	27	33,75	40,5
18		9	18	27	36	45	54
22,5		11,25	22,5	33,75	45	56,25	67,5
27		13,5	27	40,5	54	67,5	81

La figura que tenim a continuació ens mostra com és la geometria del talús que hem definit i com estan disposades les capes de les dues argiles.

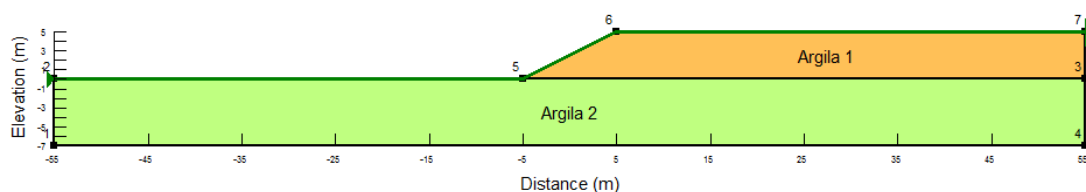


Figura 75 Geometria del talús corresponent al cas 2

4.4.1 GEO-SLOPE

En aquest segon cas hem definit que el tipus d'anàlisi sigui el mètode de Bishop, tal i com ens mostra la següent figura. També podem veure com a la pestanya de *Settings* hem definit que els materials no estiguin afectats per la pressió de porus d'aigua ja que ens trobem en argiles seques.

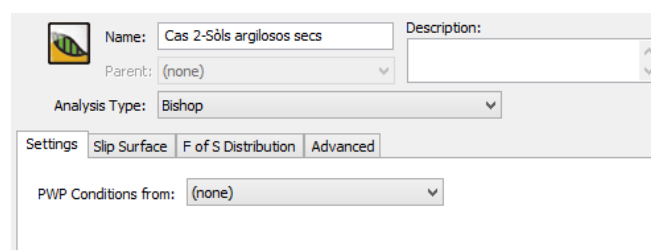


Figura 76 Finestra per definir propietats i el tipus d'anàlisi. Programa GEO-SLOPE.

4.4.2 PLAXIS 2D AE

La figura que tenim a continuació ens mostra la malla la qual s'obté un cop definits els paràmetres i les estructures i les condicions de contorn a les quals està afectat aquest talús.

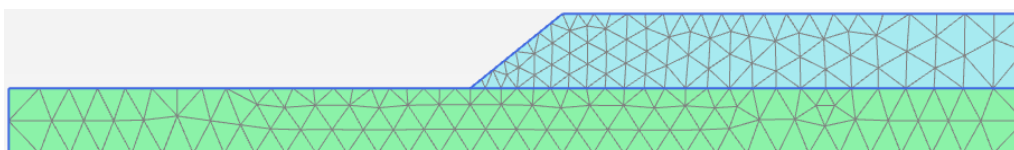


Figura 77 Malla que es crea per aquesta geometria. Programa PLAXIS

La Taula 6 representa un recull tots els paràmetres que hem introduït al programa PLAXIS. Quan definim a PLAXIS que es tracta d'una cas *Undrained* no ens permet introduir valors d'angle de fricció ni de dilatància.

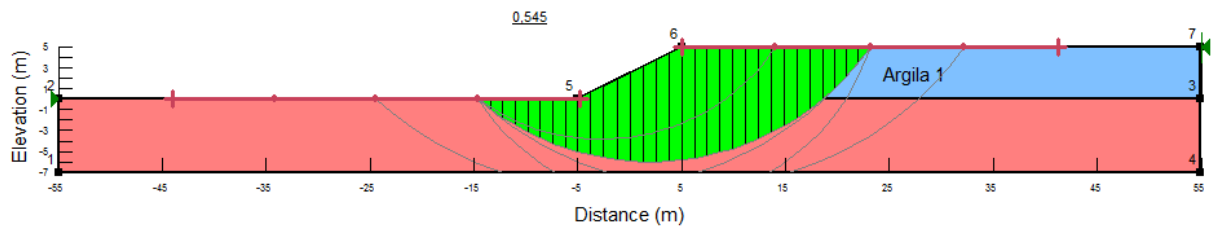
Taula 6 Resum dels paràmetres introduïts per aquest cas 2

Parameter	Name	Material 1	Material 2	Units
General				
Material model	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Drainage type	Type	Undrained (B)	Undrained (B)	-
Soil unit weight above p.l	γ_{unsat}	18	18	KN/m^3
Soil unit weight below p.l	γ_{sat}	18	18	KN/m^3
Parameters				
Young's modulus	E'	50000	50000	KN/m^2
Poisson ratio	ν'	0,33	0,33	-
Cohesion	c'	variable	variable	KN/m^2
Friction angle	ϕ'	0	0	º
Dilatancy angle	ψ'	0	0	º
Flow				
Horizontal permeability	k_x	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	m/day
Vertical permeability	k_y	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	m/day

4.4.3 Anàlisi dels casos

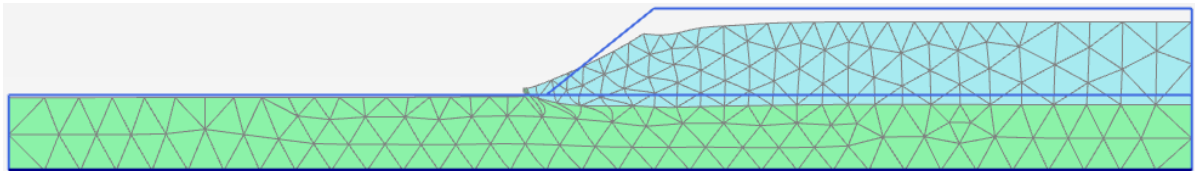
- $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 6,75 \text{ kPa}$]
 - GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

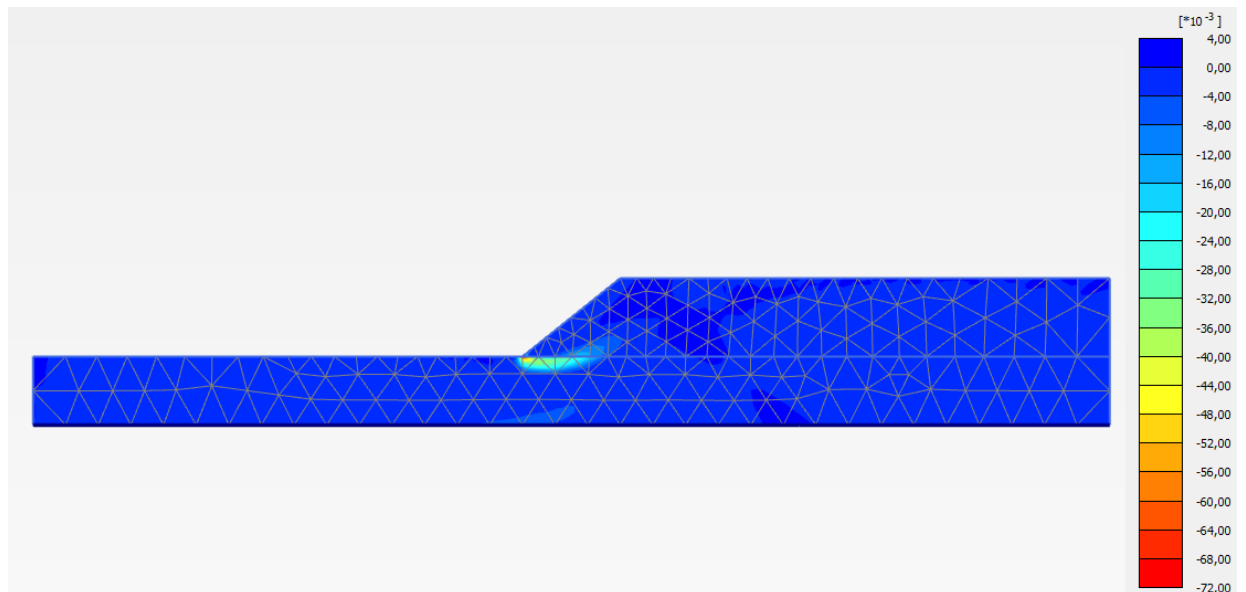
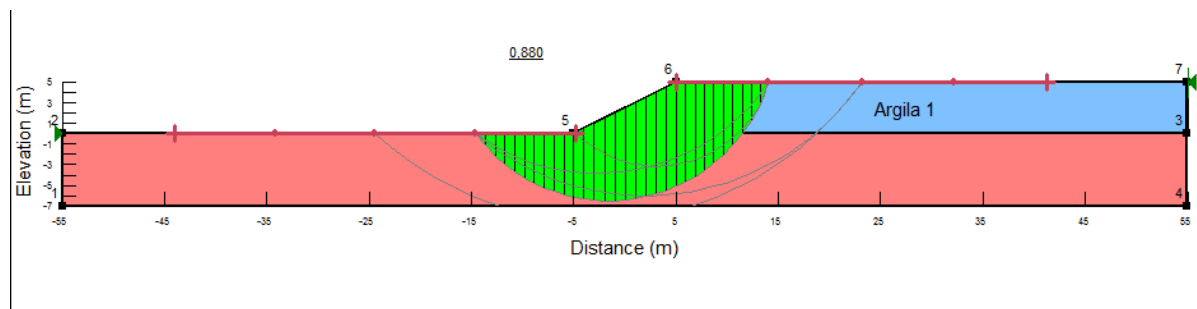


Figura 78 Cas 2. $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 6,75 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 13,5$ kPa]

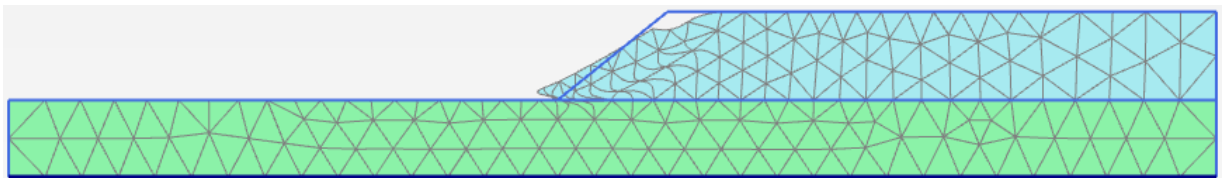
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

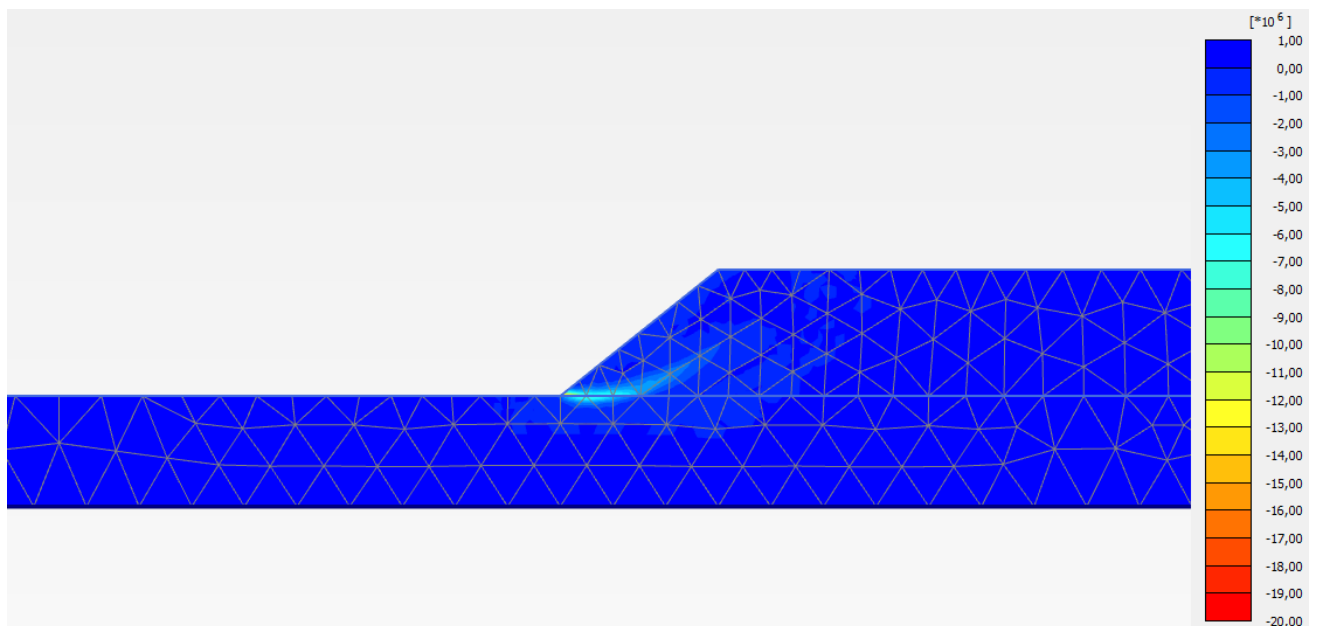
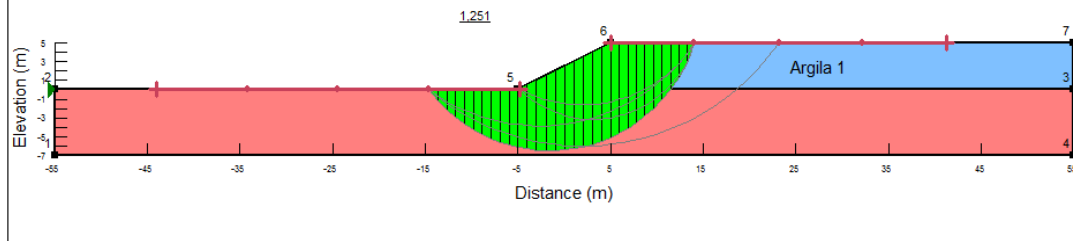


Figura 79 Cas 2. $c_1 = 13,5$ kPa i $c_2 = 13,5$ kPa . (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 20,25$ kPa]

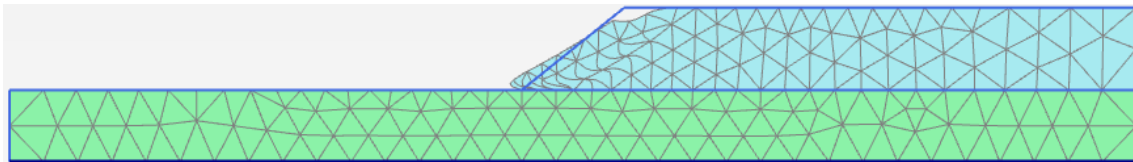
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

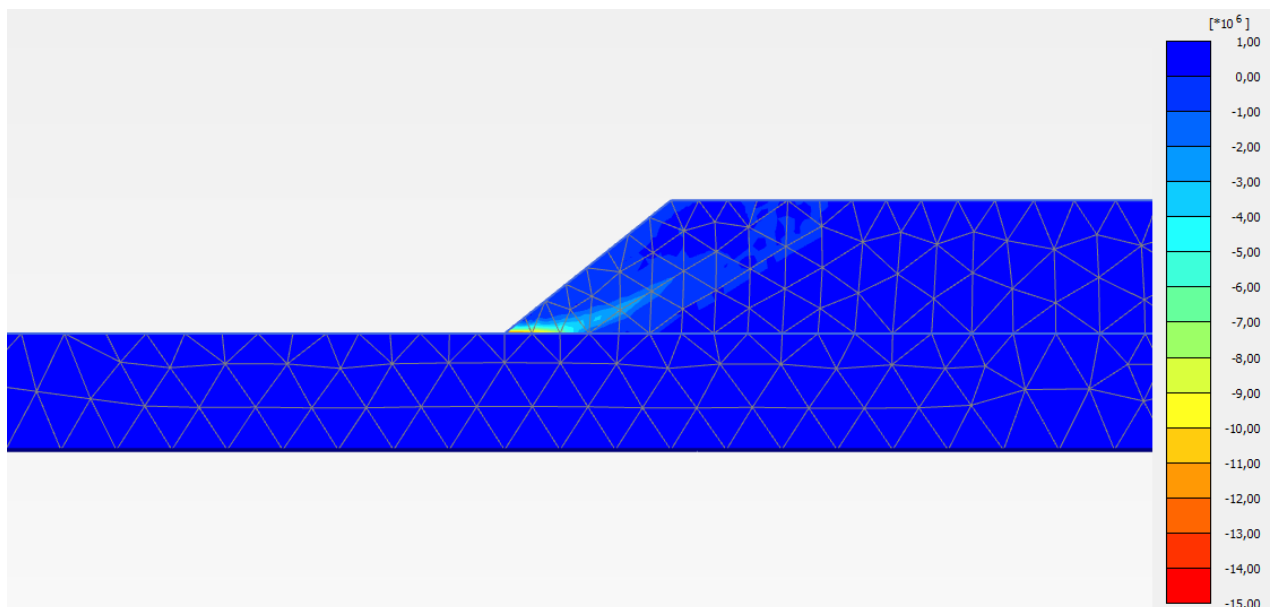
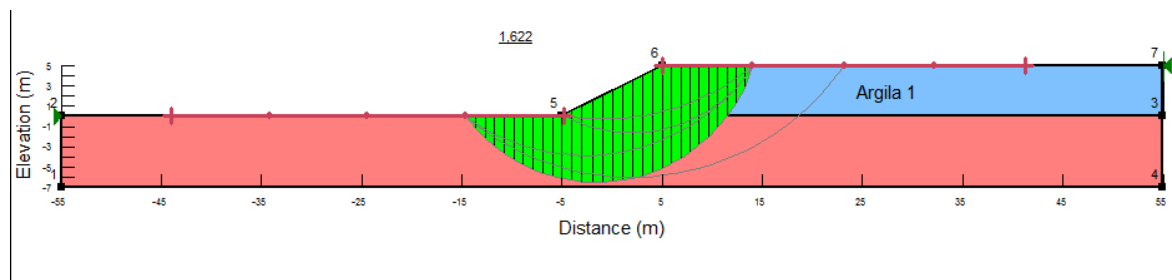


Figura 80 Cas 2. $c_1 = 13,5$ kPa i $c_2 = 20,25$ kPa . (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

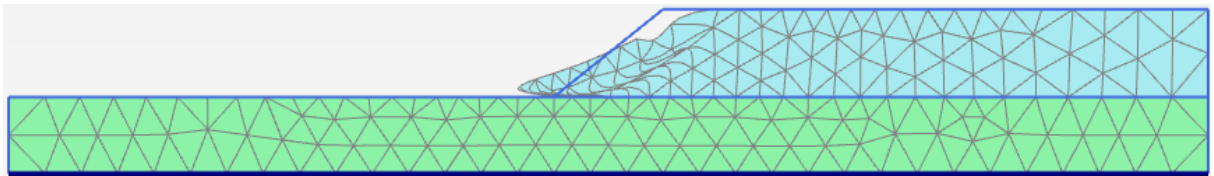
- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 27$ kPa]
 - GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

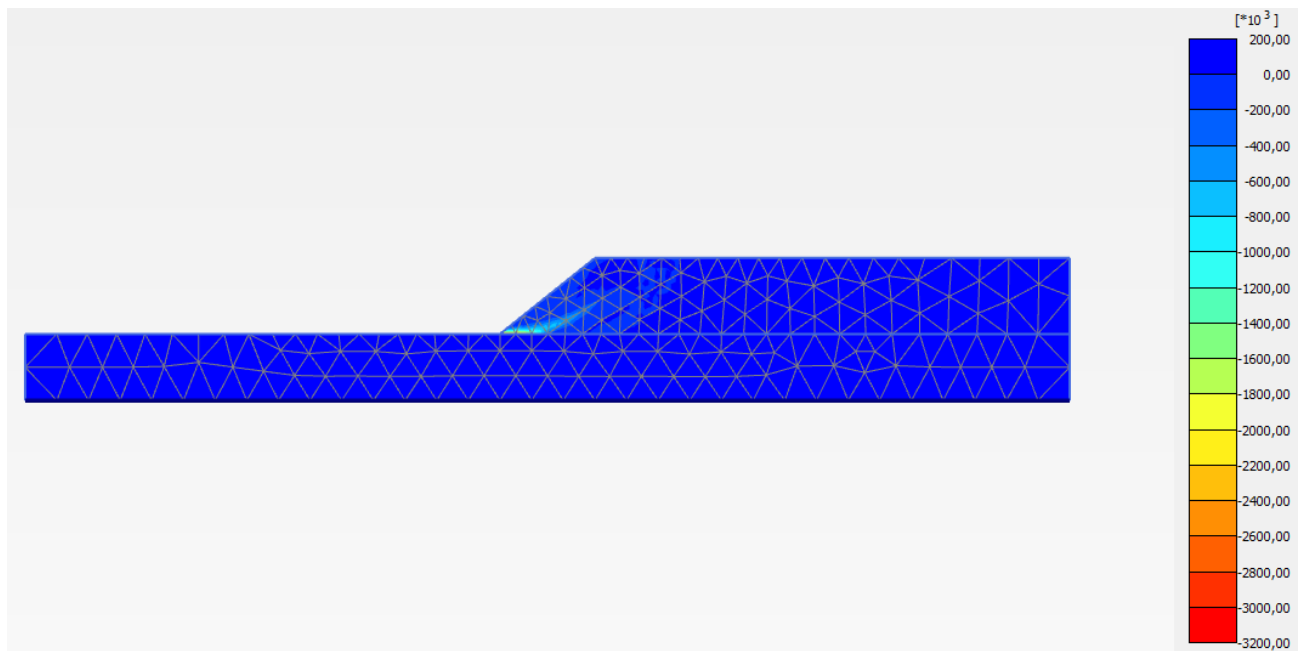
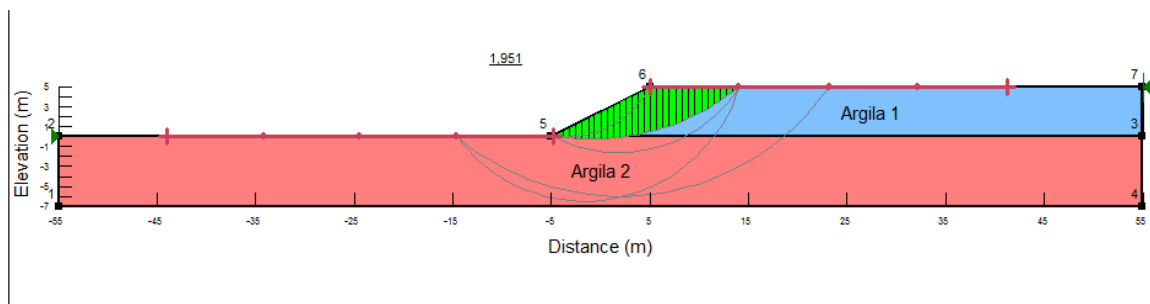


Figura 81 Cas 2. $c_1 = 13,5$ kPa i $c_2 = 27$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 33,75$ kPa]

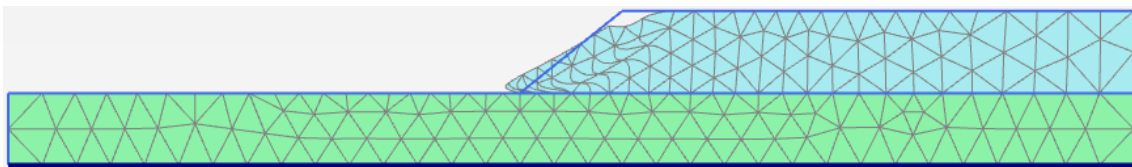
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

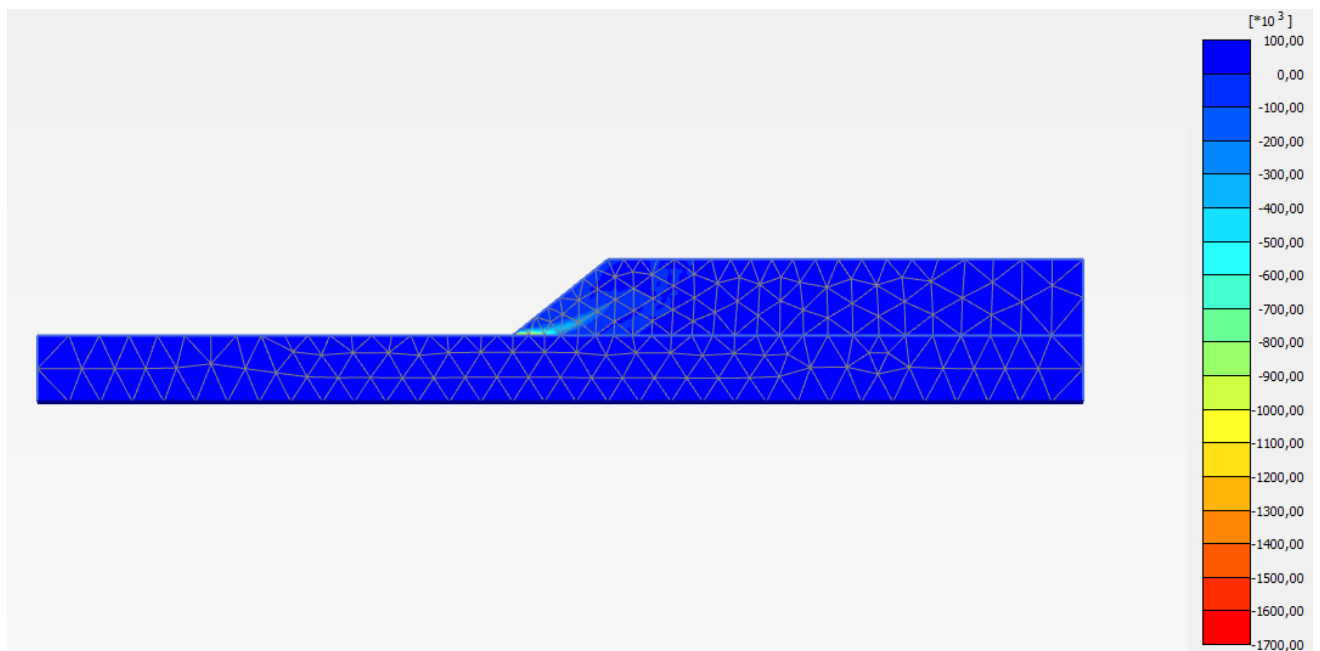
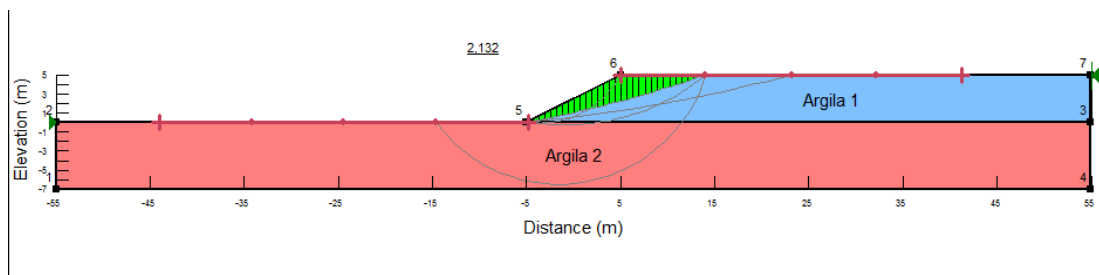


Figura 82 Cas 2. $c_1 = 13,5$ kPa i $c_2 = 33,75$ kPa . (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 40,5$ kPa]

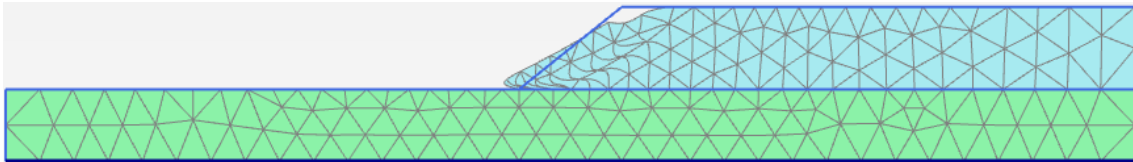
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

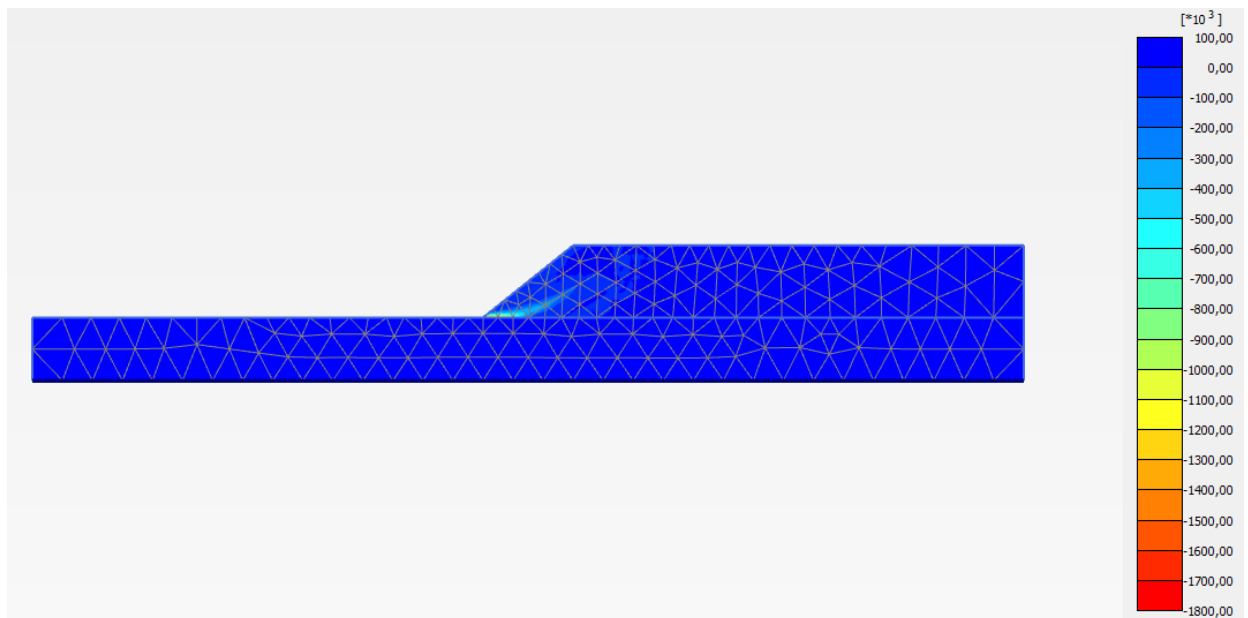
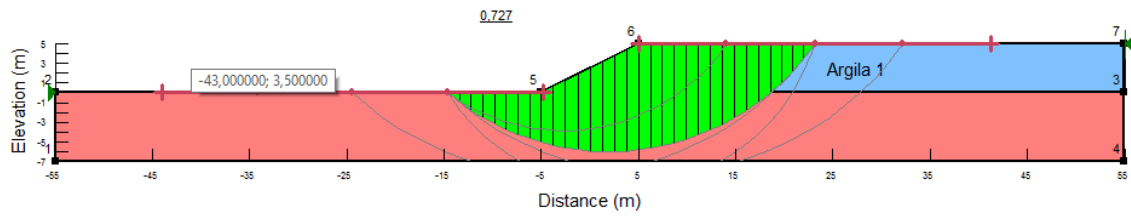


Figura 83 Cas 2. $c_1 = 13,5$ kPa i $c_2 = 40,5$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

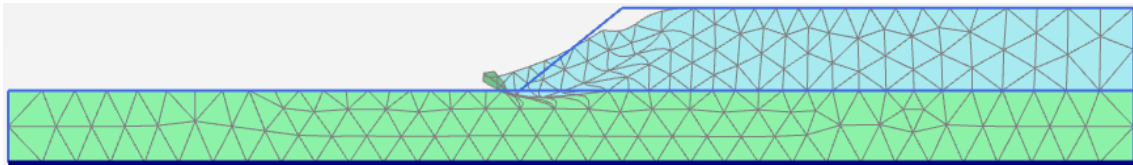
- $c_1 = 18 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 9 \text{ kPa}$]
 - GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

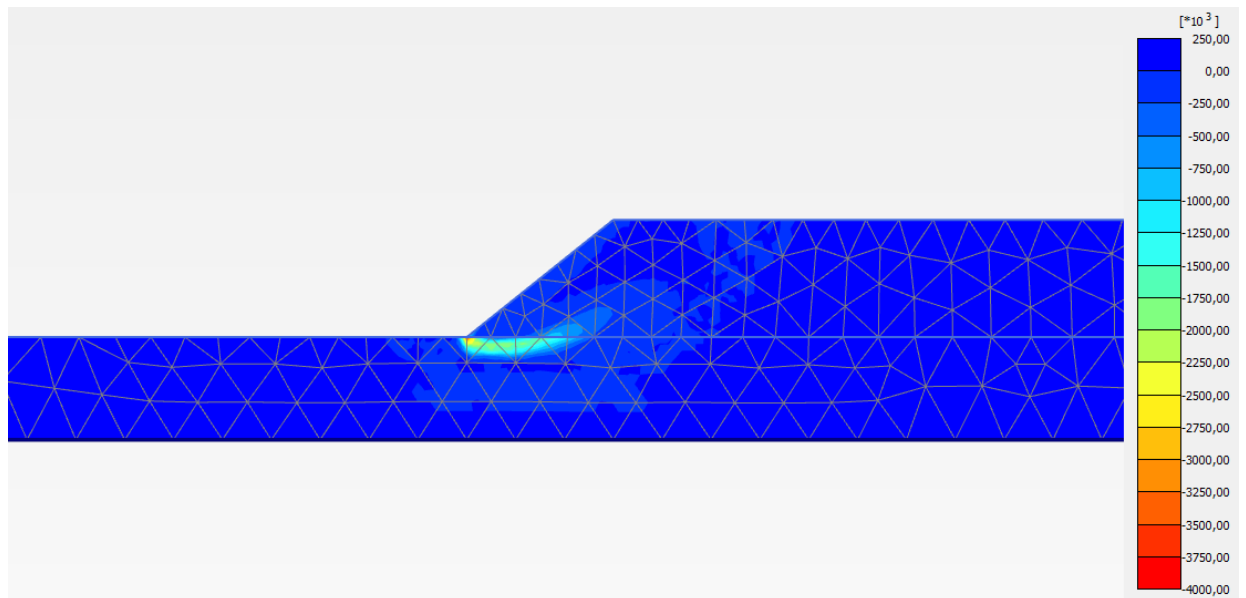
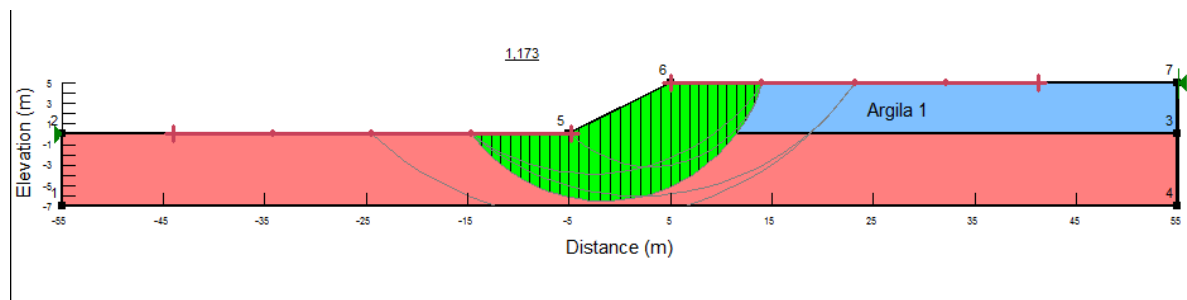


Figura 84 Cas 2. $c_1 = 18 \text{ kPa}$ i $c_2 = 9 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

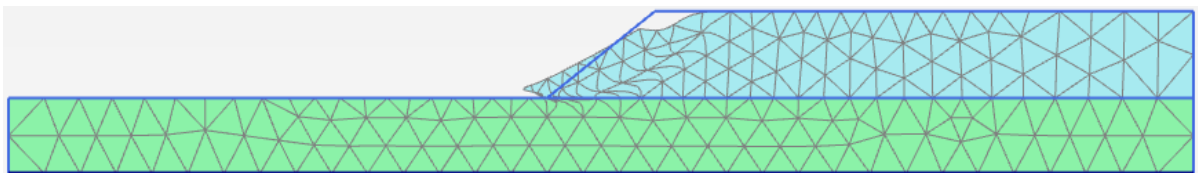
- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 18$ kPa]
 - GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

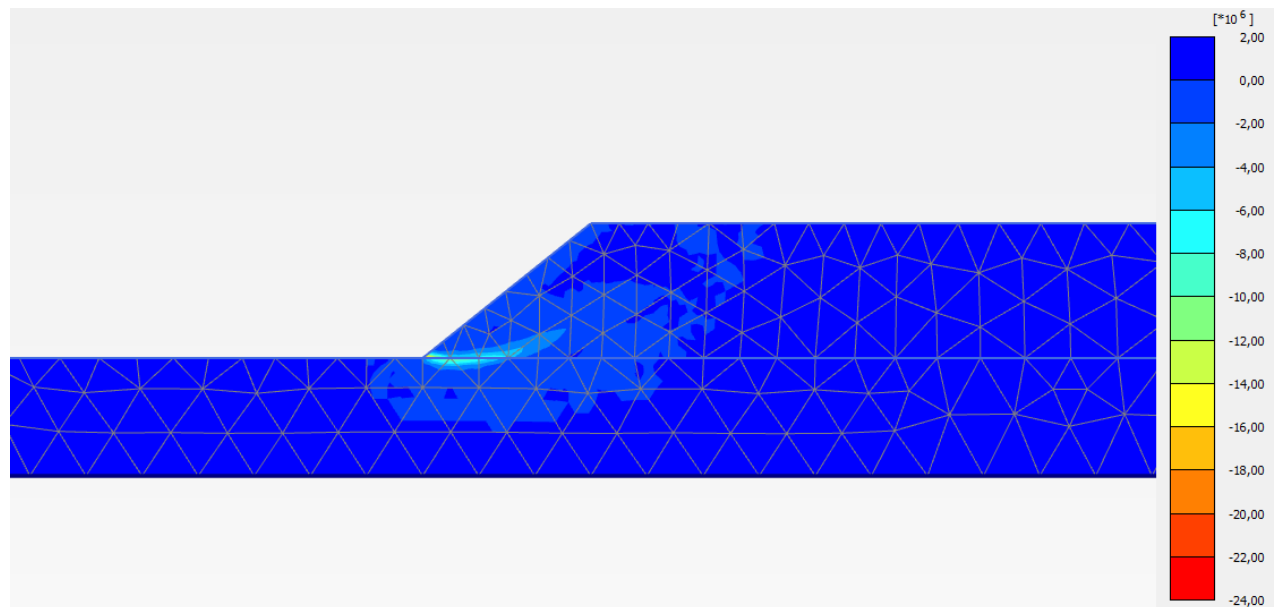
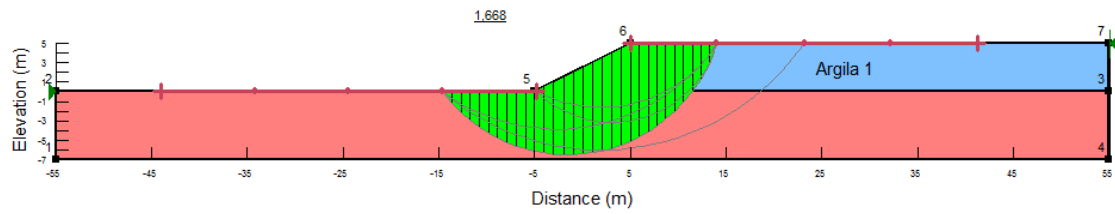


Figura 85 Cas 2. $c_1 = 18$ kPa i $c_2 = 18$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 27$ kPa]

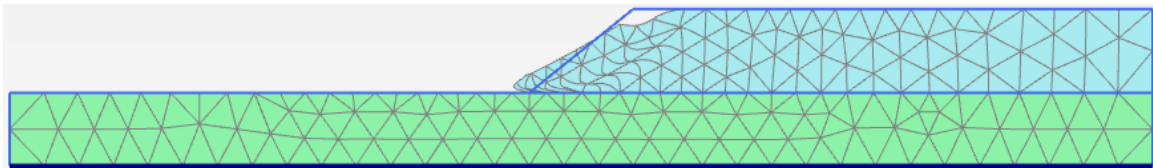
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

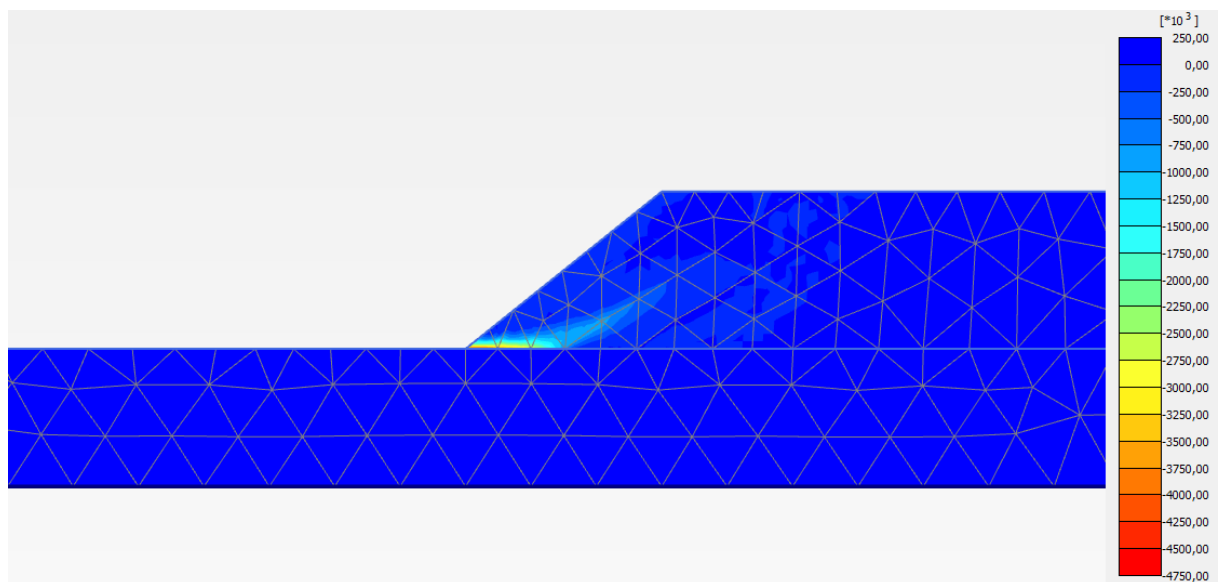
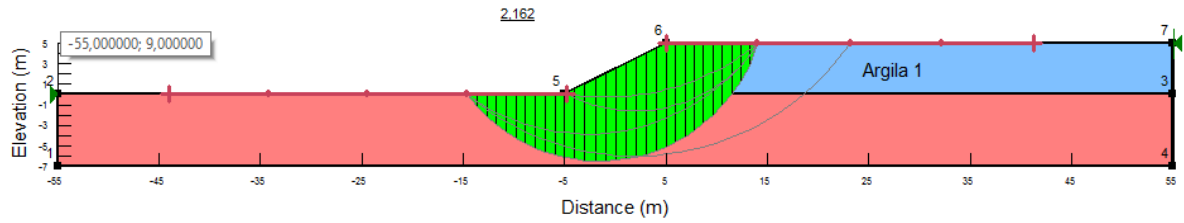


Figura 86 Cas 2. $c_1 = 18$ kPa i $c_2 = 27$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

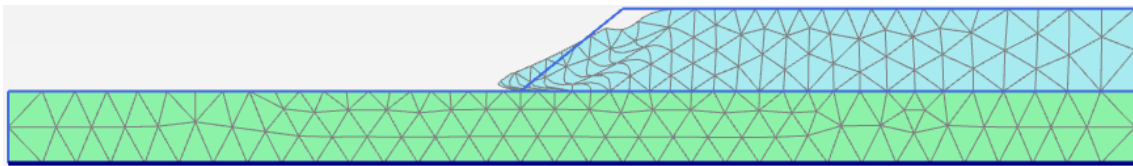
- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 36$ kPa]
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

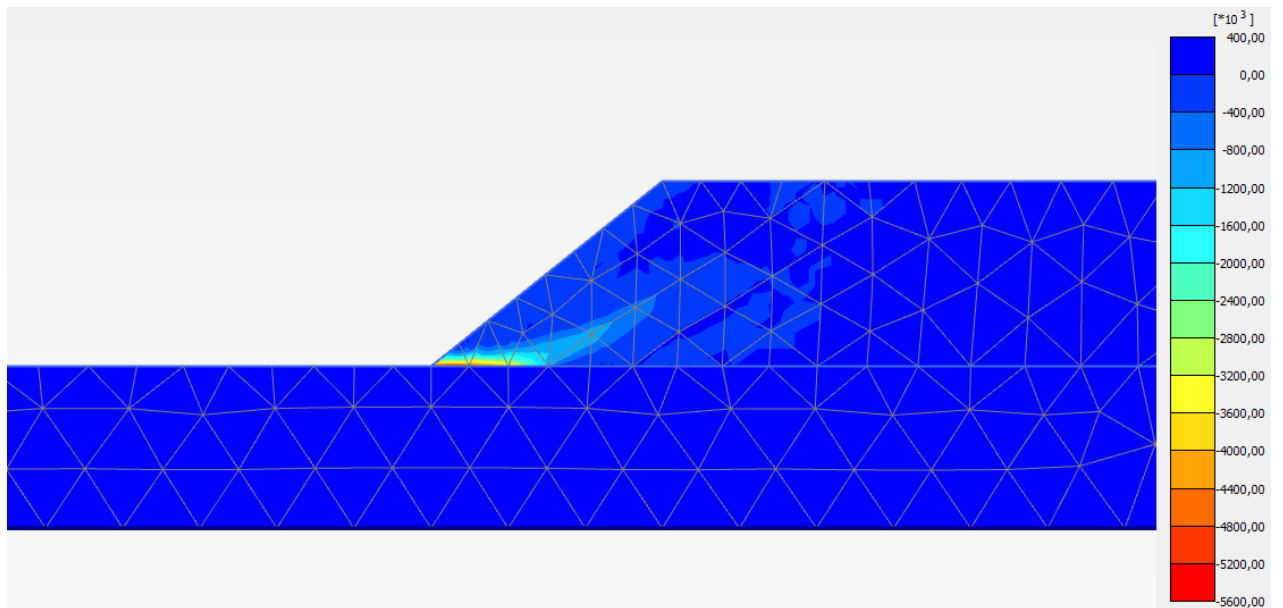
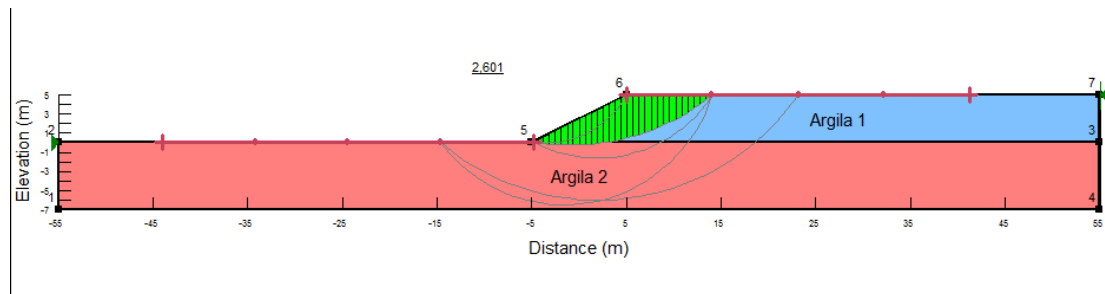


Figura 87 Cas 2. $c_1 = 18$ kPa i $c_2 = 36$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 45$ kPa]

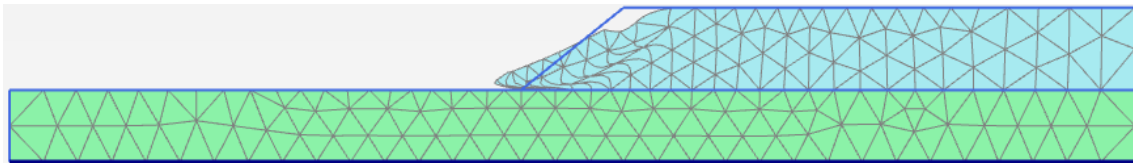
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

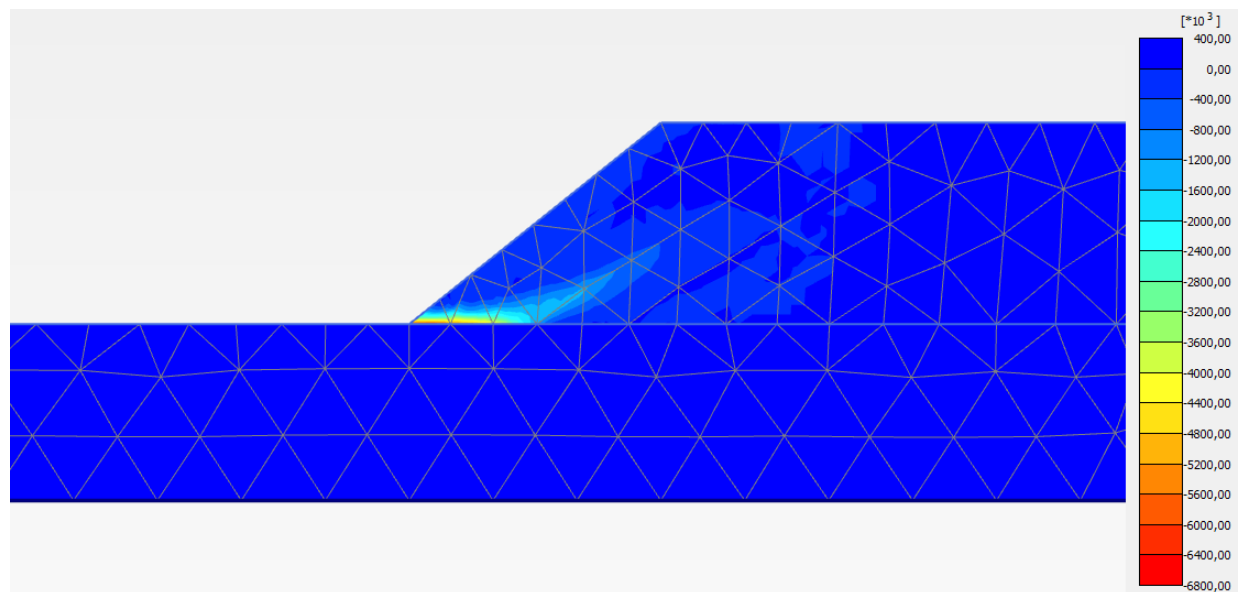
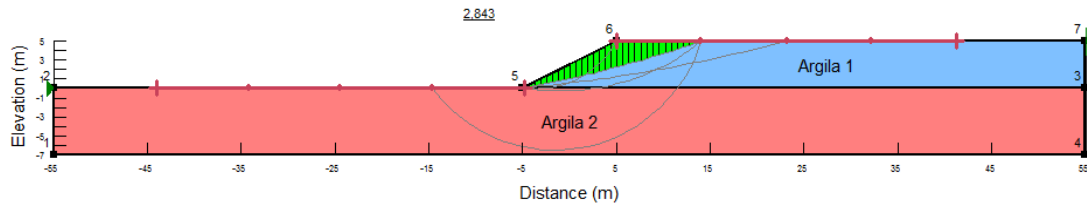


Figura 88 Cas 2. $c_1 = 18$ kPa i $c_2 = 45$ kPa. (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

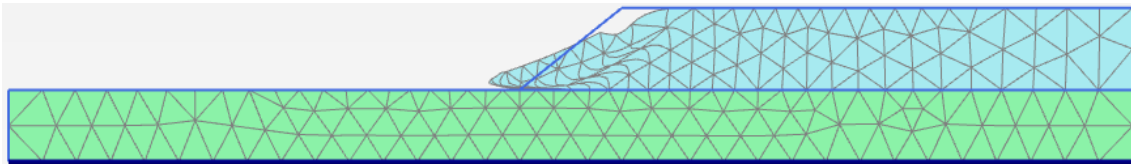
- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 54$ kPa]
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

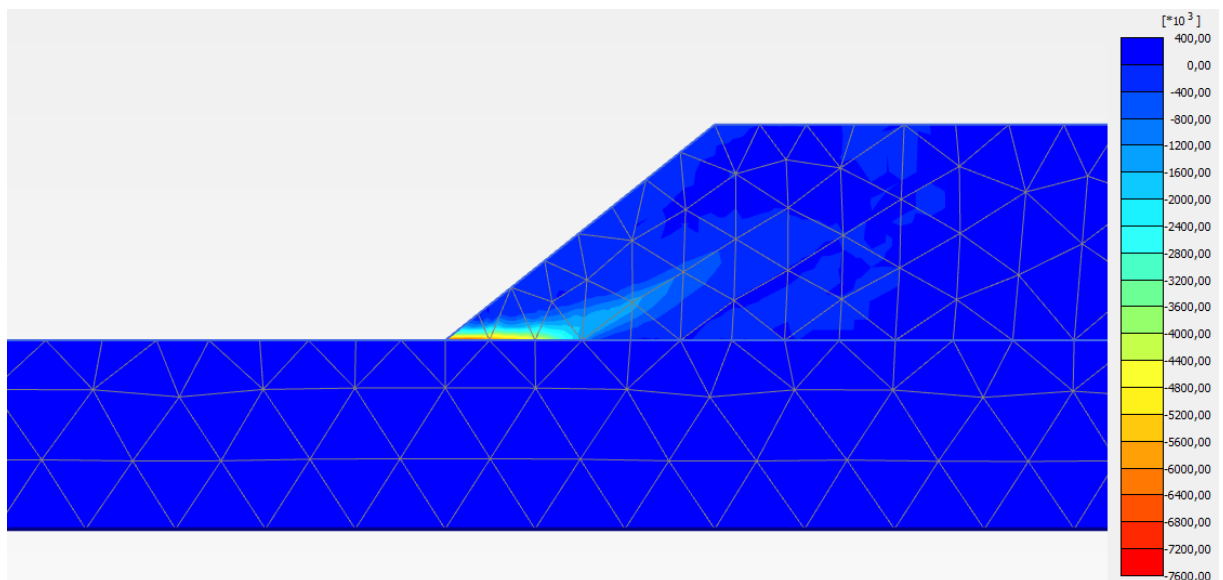
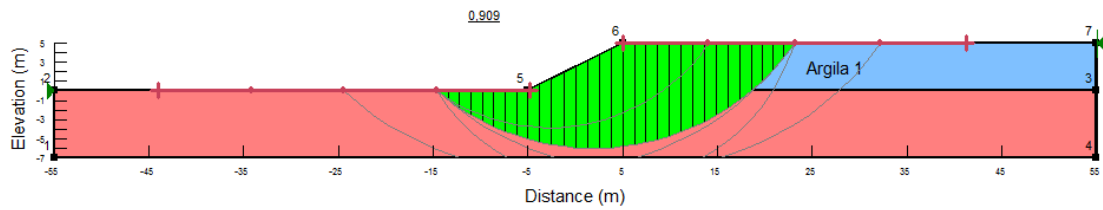


Figura 89 Cas 2. $c_1 = 18$ kPa i $c_2 = 54$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

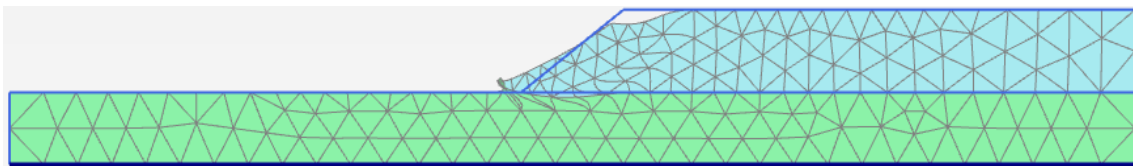
- $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 11,25 \text{ kPa}$]
 - GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

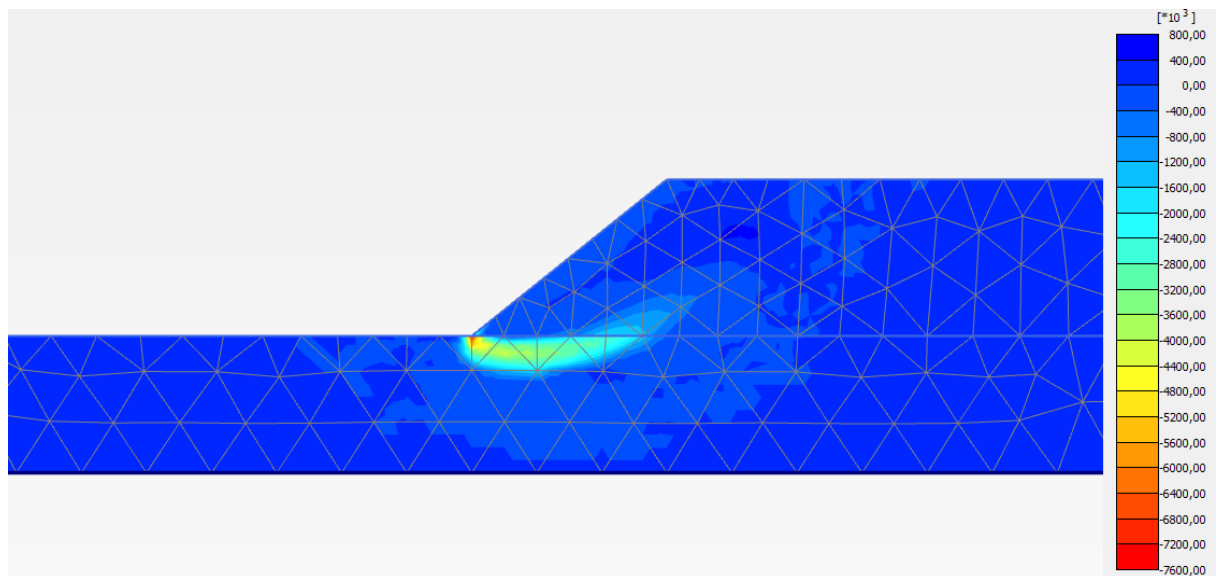
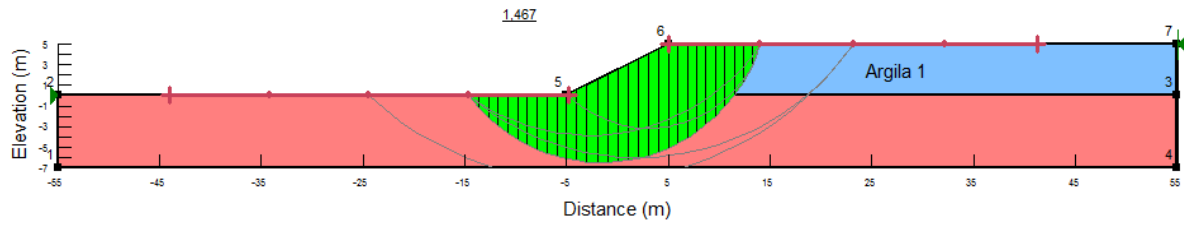


Figura 90 Cas 2. $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$ i $c_2 = 11,25 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 22,5$ kPa]

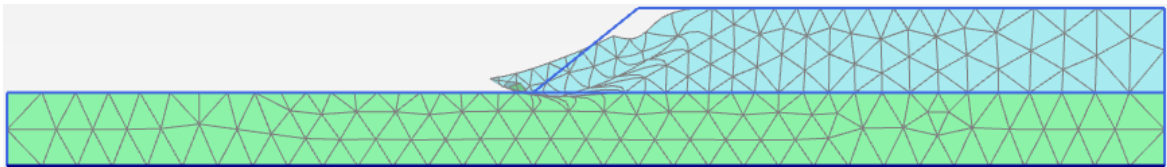
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

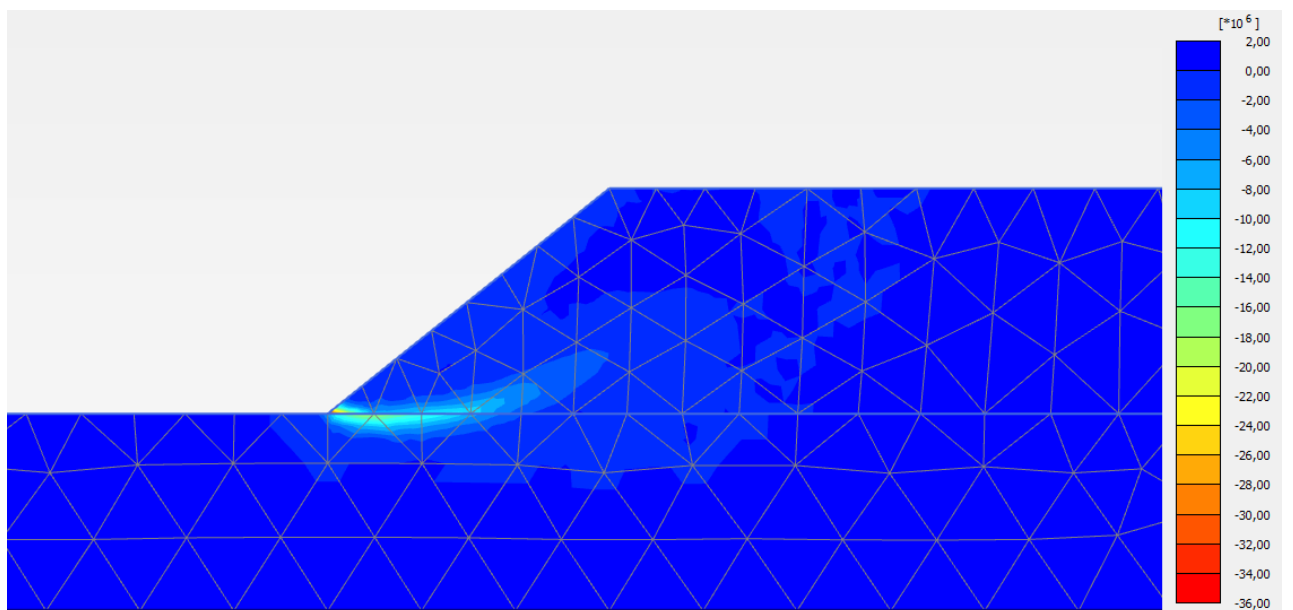
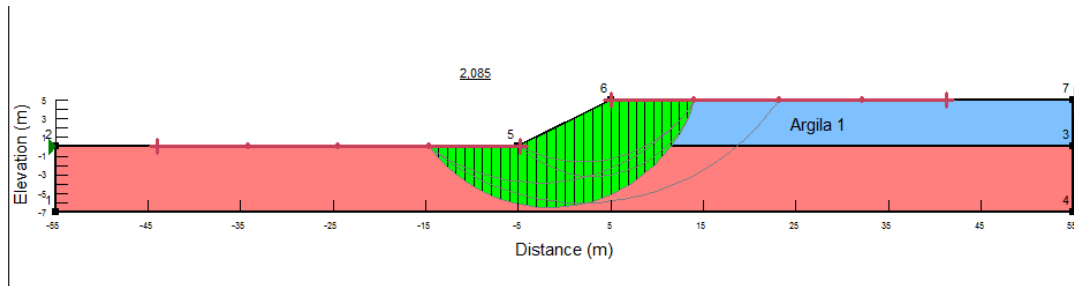


Figura 91 Cas 2. $c_1 = 22,5$ kPa i $c_2 = 22,5$ kPa . (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

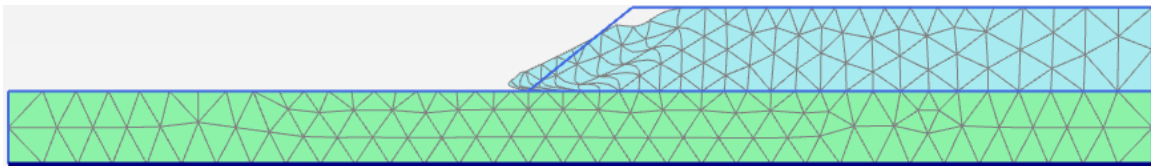
- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 33,75$ kPa]
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

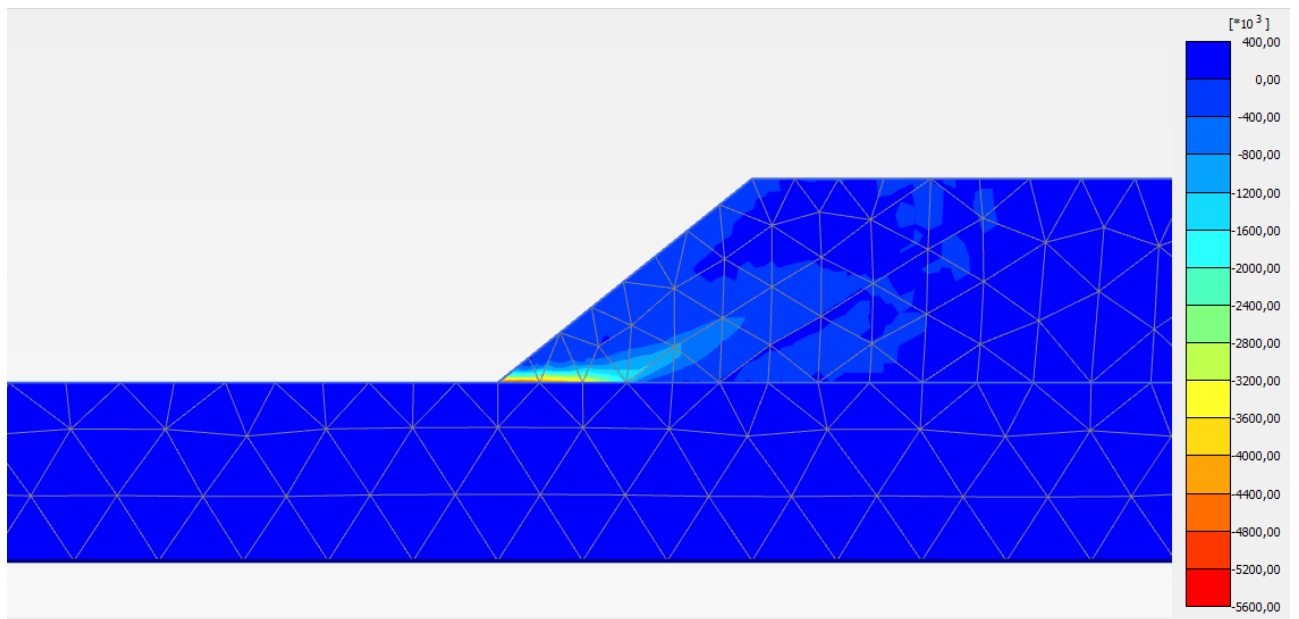
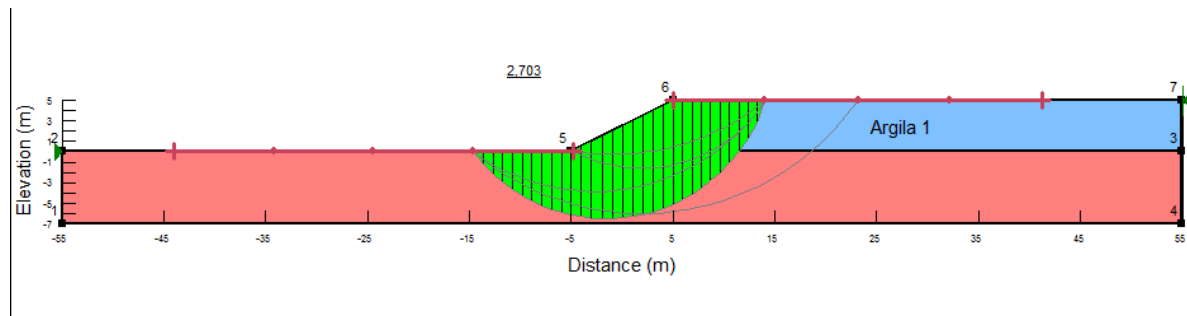


Figura 92 Cas 2. $c_1 = 22,5$ kPa i $c_2 = 33,75$ kPa . (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

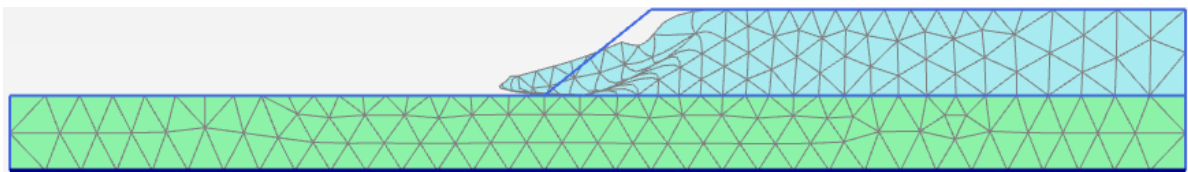
- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 45$ kPa]
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

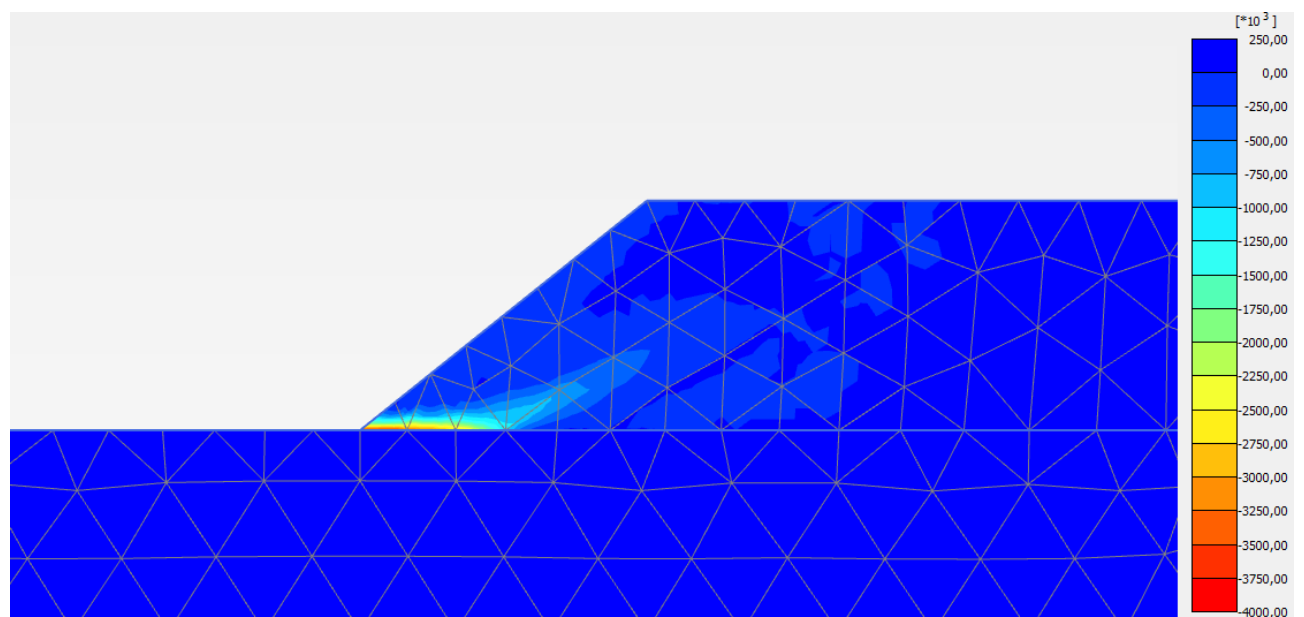
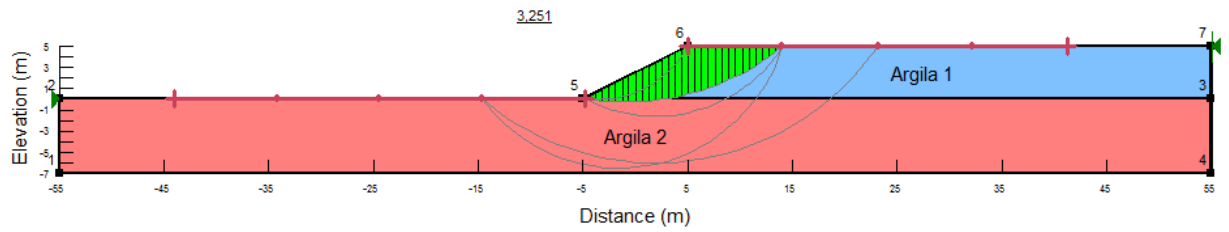


Figura 93 Cas 2. $c_1 = 22,5$ kPa i $c_2 = 45$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

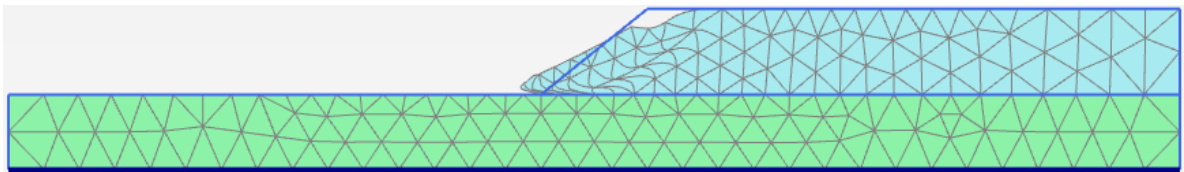
- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 56,25$ kPa]
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

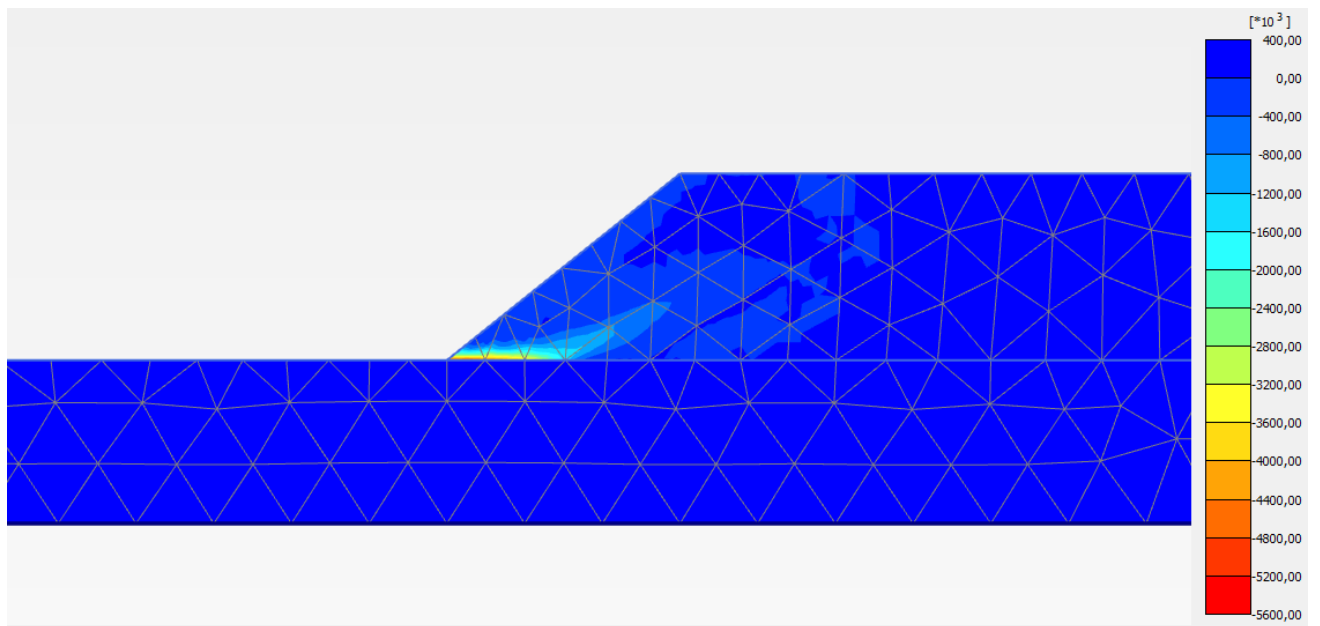
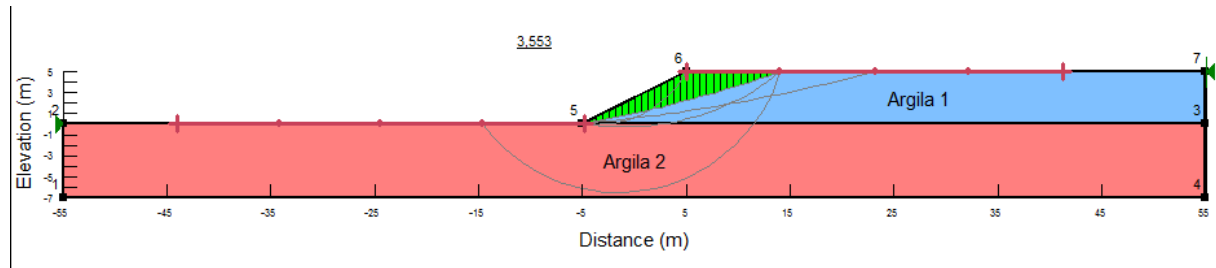


Figura 94 Cas 2. $c_1 = 22,5$ kPa i $c_2 = 56,25$ kPa . (a)Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b)Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 67,5$ kPa]

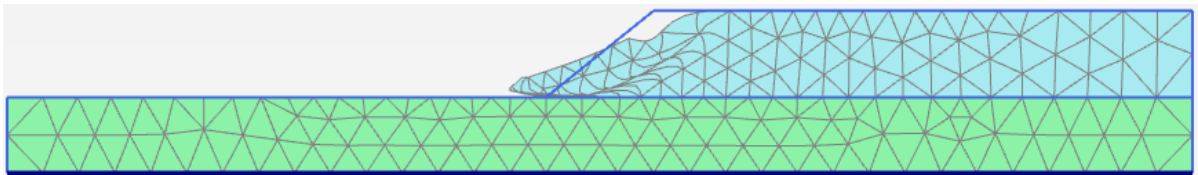
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

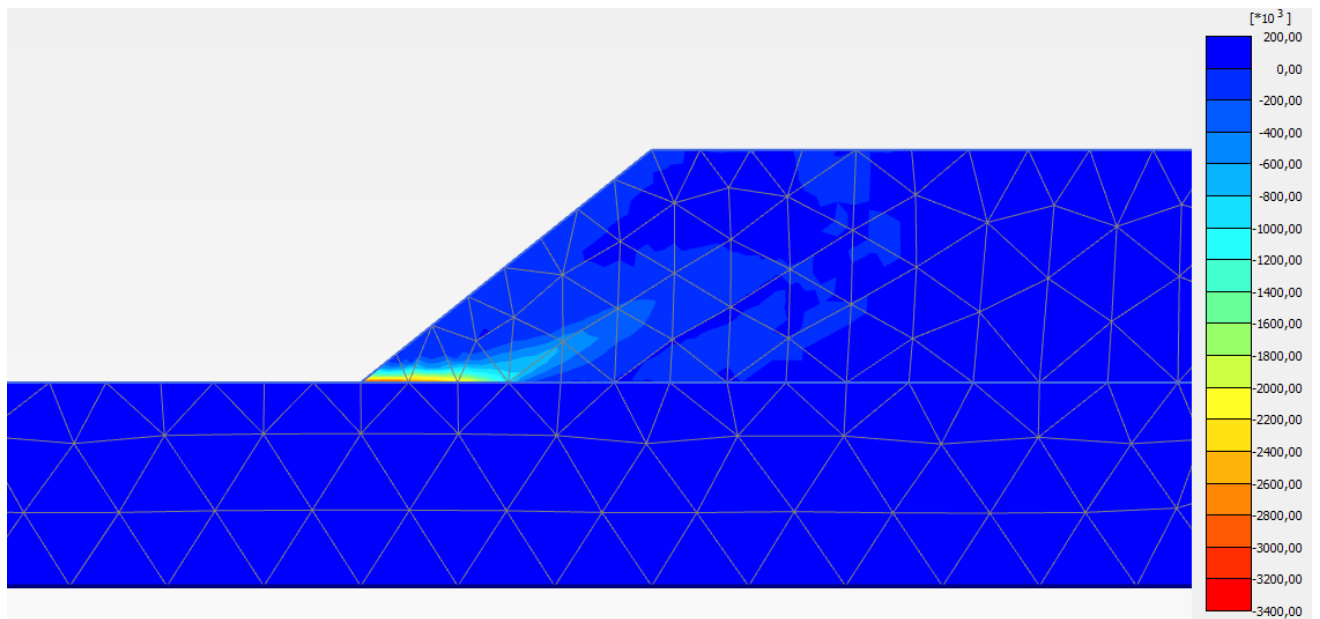
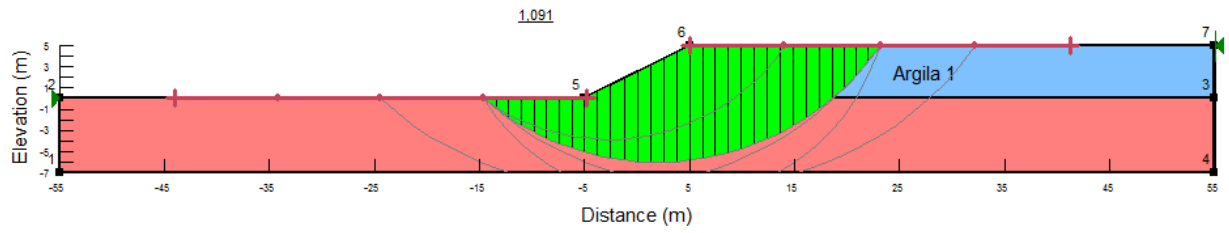


Figura 95 Cas 2. $c_1 = 22,5$ kPa i $c_2 = 67,5$ kPa . (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

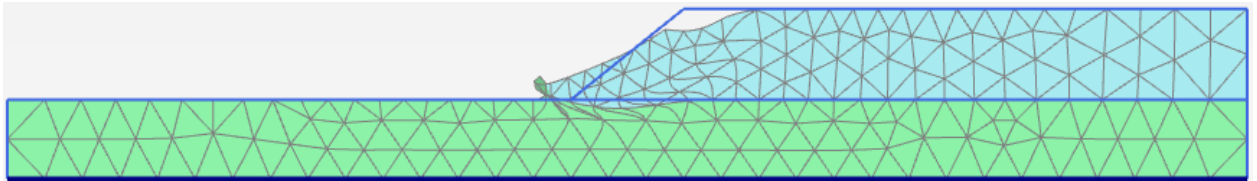
- $c_1 = 27 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 13,5 \text{ kPa}$]
 - GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

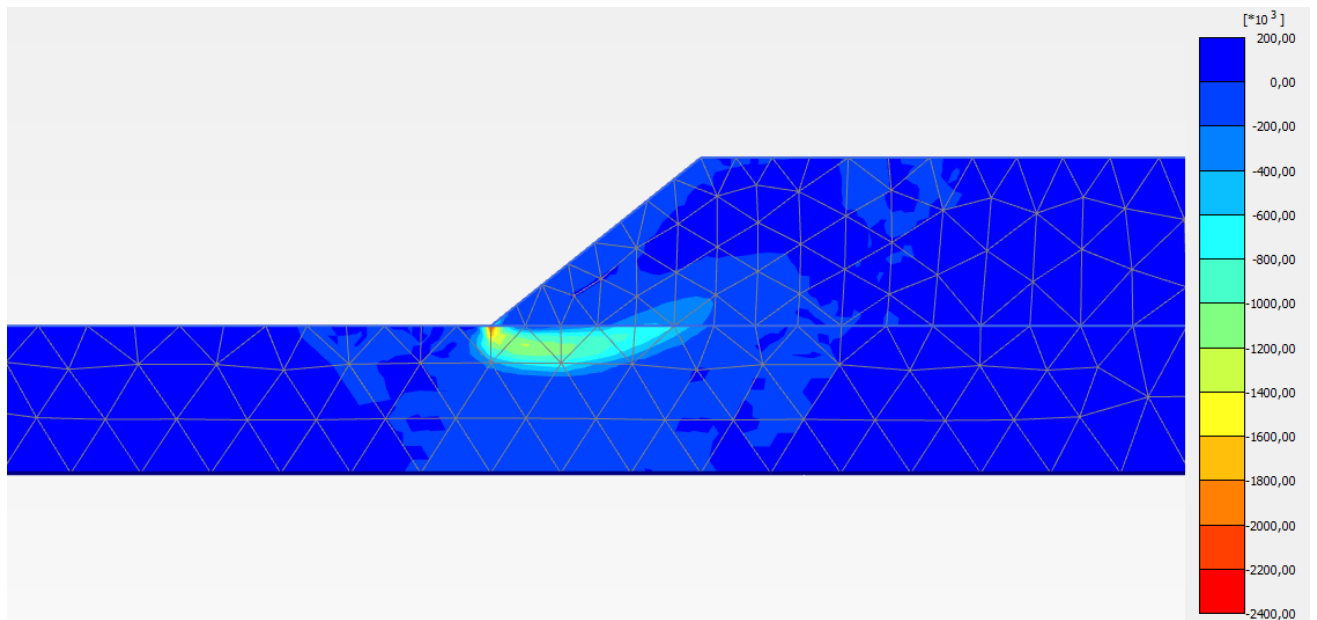
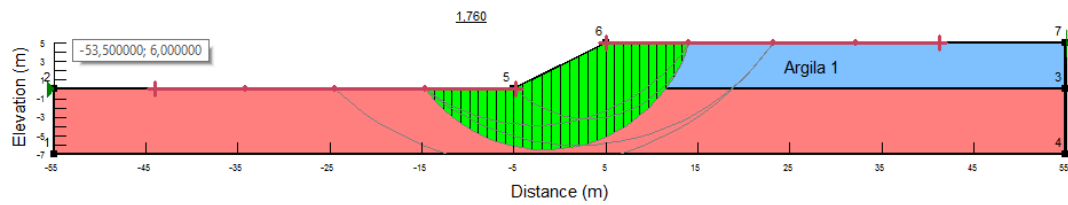


Figura 96 Cas 2. $c_1 = 27 \text{ kPa}$ i $c_2 = 13,5 \text{ kPa}$. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

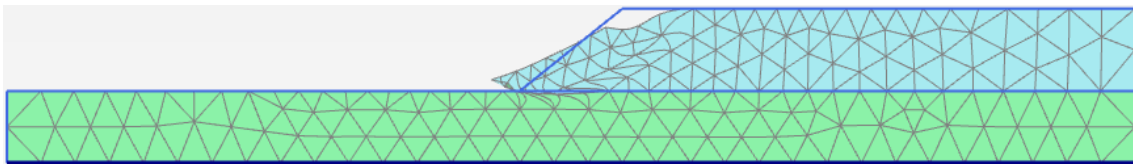
- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 27$ kPa]
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

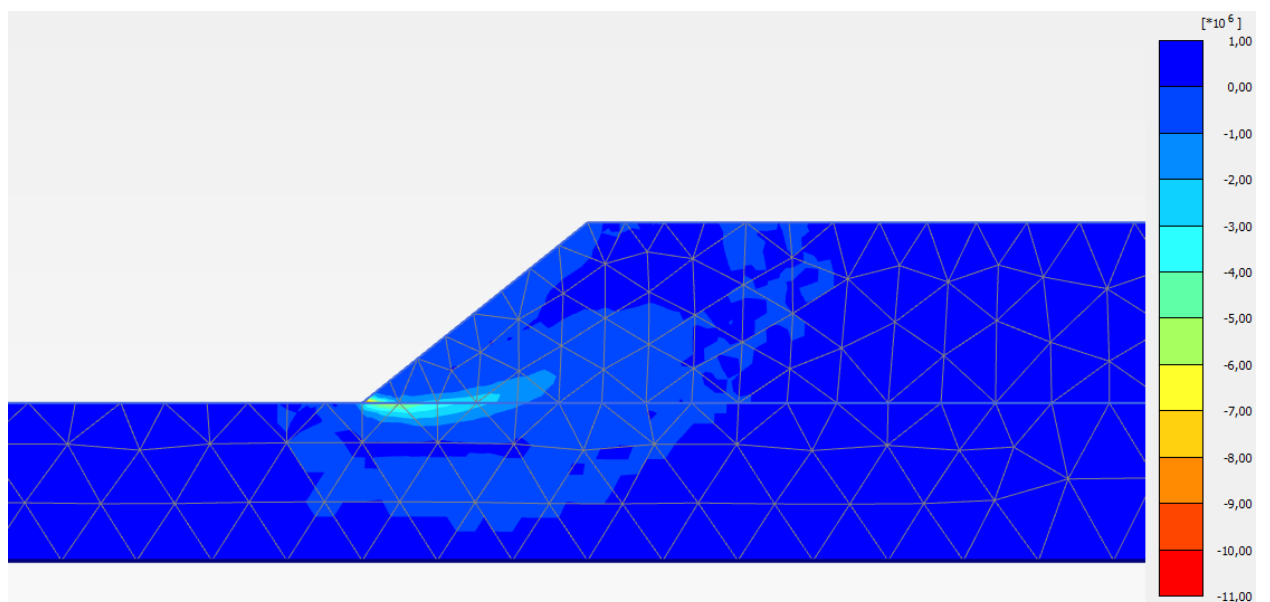
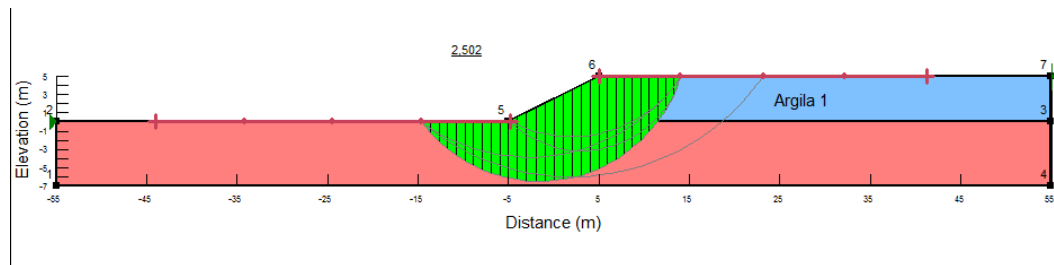


Figura 97 Cas 2. $c_1 = 27$ kPa i $c_2 = 27$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 40,5$ kPa]

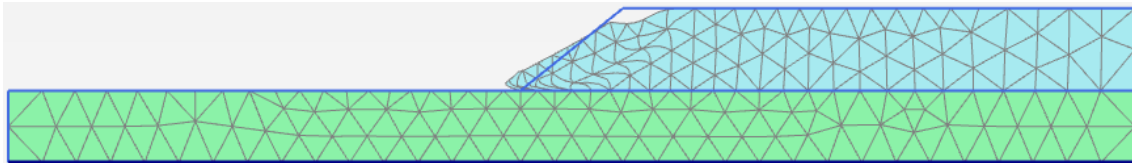
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

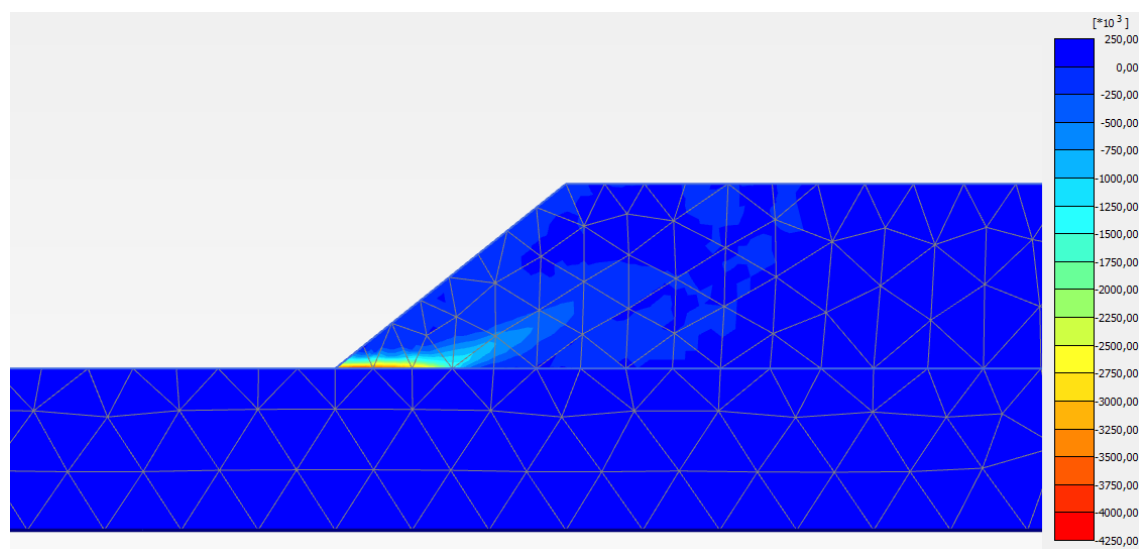
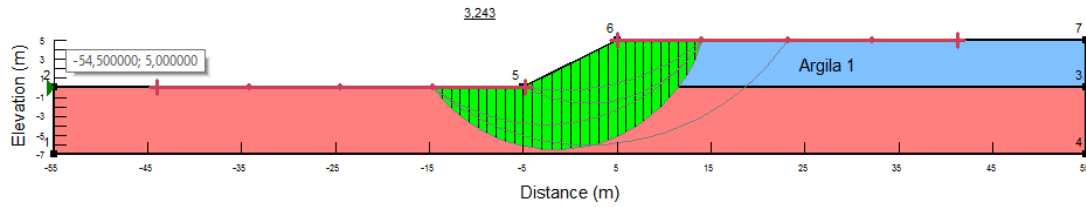


Figura 98 Cas 2. $c_1 = 27$ kPa i $c_2 = 40,5$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 54$ kPa]

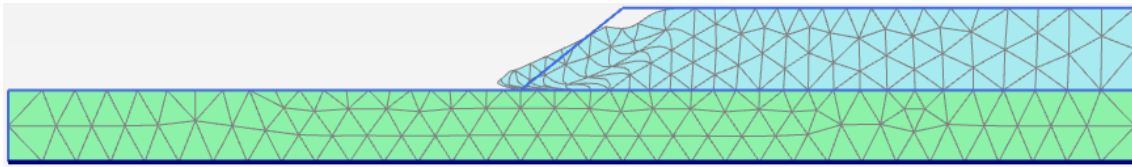
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

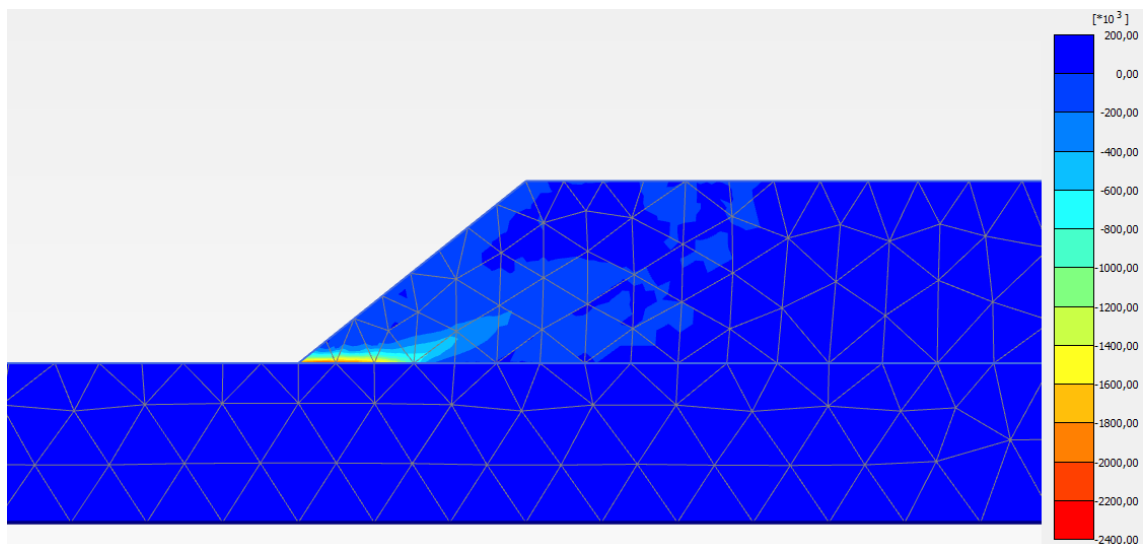
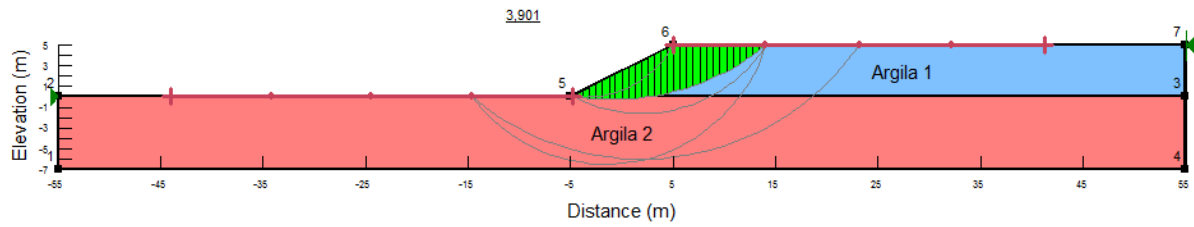


Figura 99 Cas 2. $c_1 = 27$ kPa i $c_2 = 54$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 67,5$ kPa]

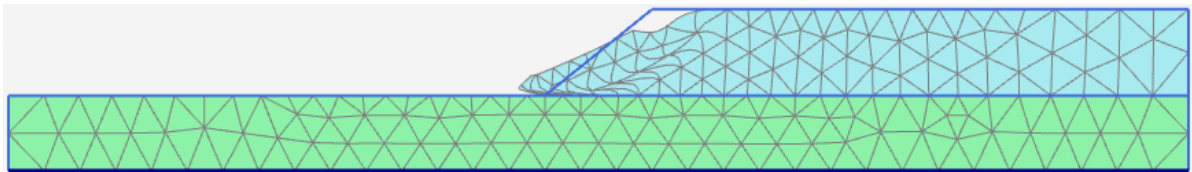
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

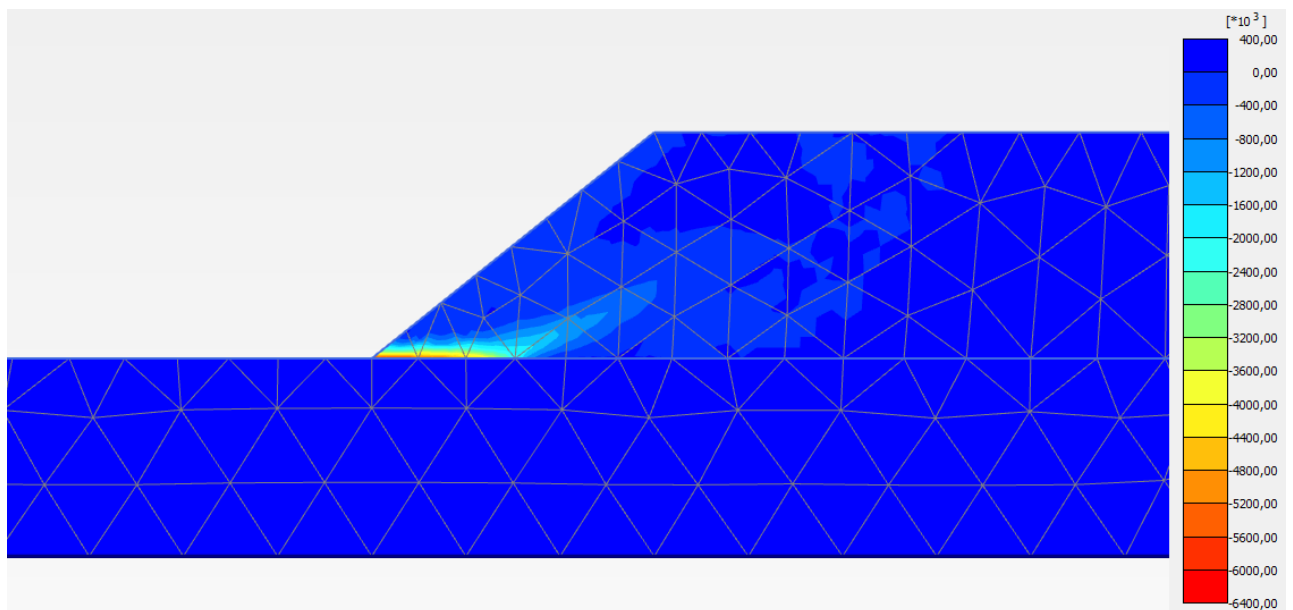
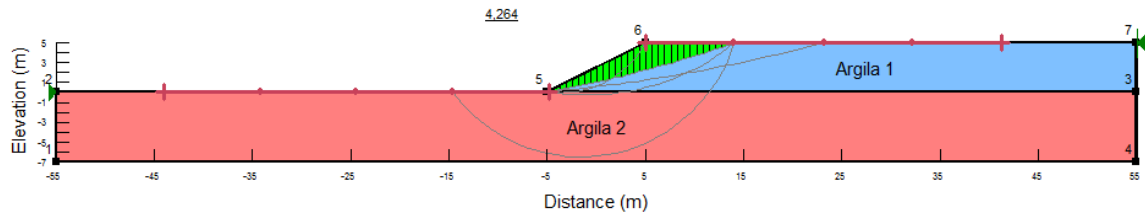


Figura 100 Cas 2. $c_1 = 27$ kPa i $c_2 = 67,5$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 81$ kPa]

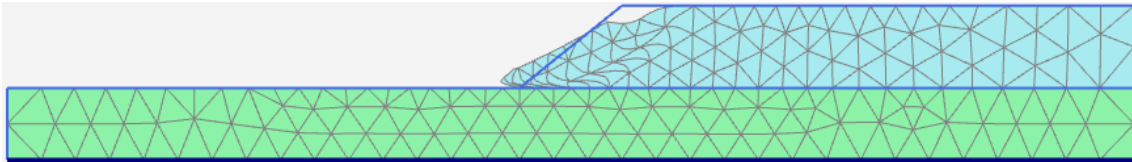
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

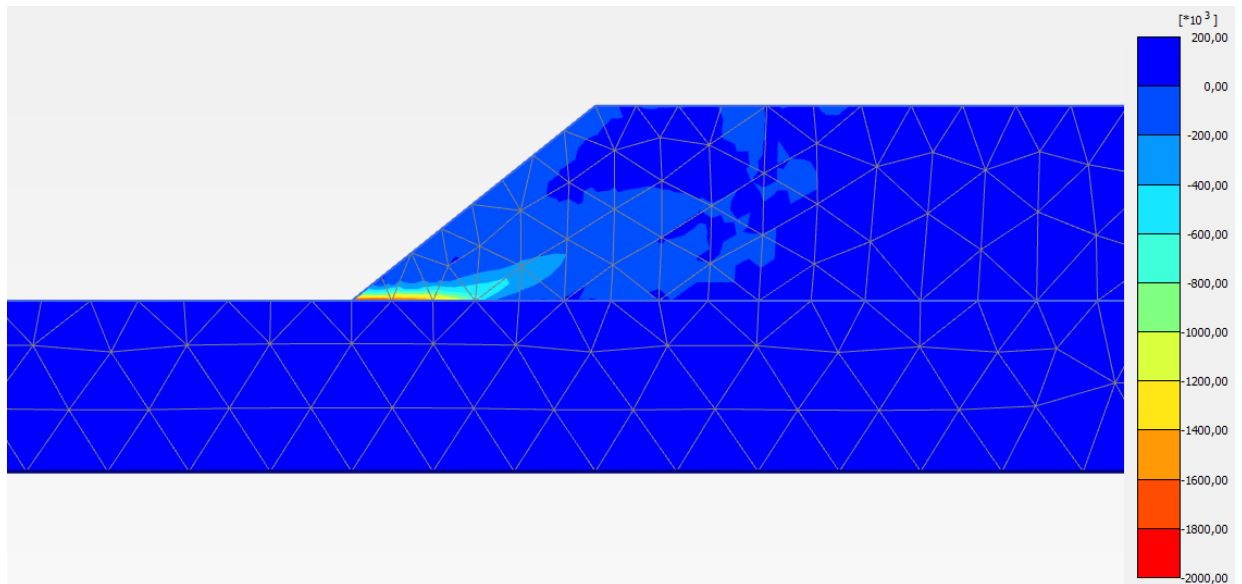


Figura 101 Cas 2. $c_1 = 27$ kPa i $c_2 = 81$ kPa. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

4.5 CAS 3: ESQUERDES A LA PART SUPERIOR DEL TALÚS

Per aquest últim cas hem volgut estudiar com afecten les esquerdes i fractures les quals es formen a les parts superiors dels talussos. Aquestes forces provoquen un desequilibri i es per això que aquest cas ha sigut objecte d'estudi. Hem volgut veure com varien els factors de seguretat ens els diferents programes tenint com a variable la distància de que es troba des del punt més alt del talús. Aquesta distància la hem anomenat S i en la taula següent hi han els casos que hem estudiat. En total són 6 casos per cadascun dels programes. La profunditat de les esquerdes són de 5 metres.

Taula 7 valors de les distàncies de les esquerdes.

$S(m)$
5
10
15
20
25
30

La figura que tenim a continuació representa la geometria i l'ordre de els capes utilitzada en aquest tercer cas. En aquest cas els tres materials seran els mateixos per tots els cassos i la única variable serà la distància S . Els materials que s'han definit són tres sorres les quals es caracteritzen per tenir una permeabilitat moderada, tal i com es pot veure a la Taula 8. Els materials 2 i 3 estan saturats perquè queden per sota del nivell freàtic mentre que el material 1 no queda saturat perquè l'aigua es pugui infiltrar pels porus i crear aquesta inestabilitat.

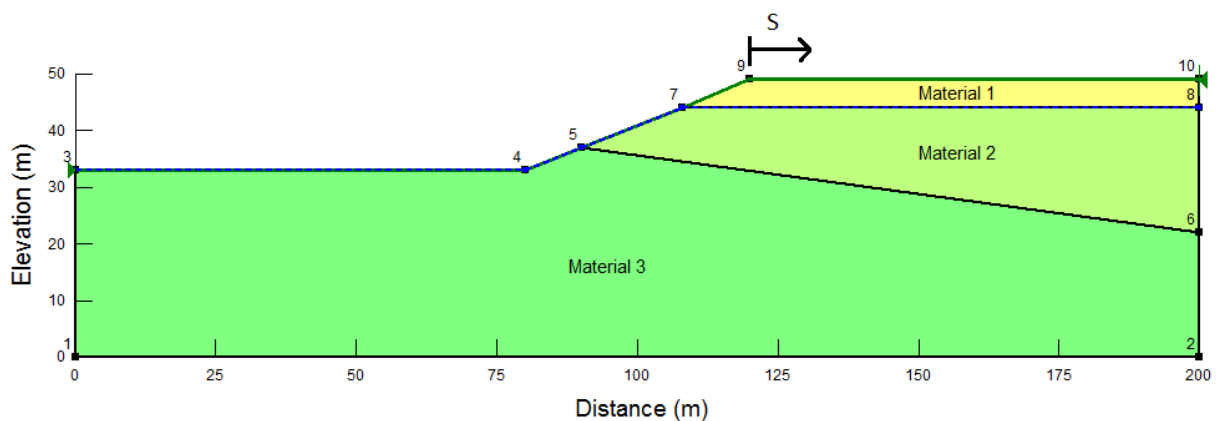


Figura 102 Geometria del talús corresponent al cas 3

4.5.1 GEO-SLOPE

Alhora de definir aquest cas dins el programa GEO-SLOPE el que hem imposat és per quin punt trencarà el talús, és a dir, enlloc de definir un rang d'entrada de la superfície de trencament hem marcat el punt on es trobava l'esquerda en cada cas. D'aquesta manera estem definint al programa que aquell punt és inestable i que el més probable és que la el trencament del terreny es produeixi en aquell punt. Per aquest tercer cas, s'ha utilitzat el mètode simplificat de Janbu alhora d'escollir el mètode de trencament ja que és un mètode per superfícies no circulars.

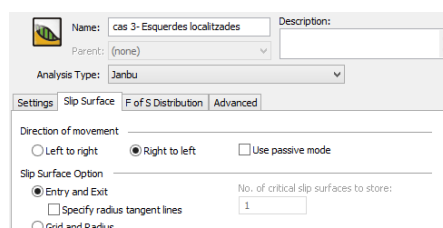


Figura 103 Finestra per definir propietats i el tipus d'anàlisi. Programa GEO-SLOPE.

4.5.2 PLAXIS 2D AE

Per aquest tercer cas, en el programa PLAXIS, les esquerdes s'han definit com petits polígons que s'han anat activant i desactivant segons la distància que demanava cada cas. En la següent figura veiem la malla que s'ha format per aquesta geometria.

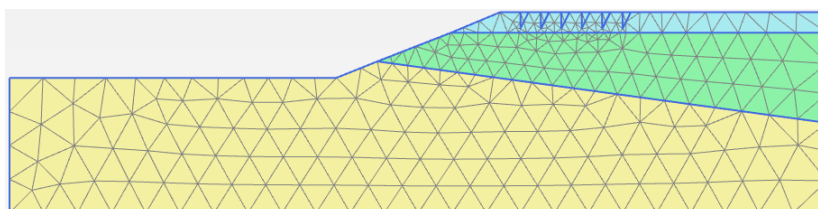


Figura 104 Geometria del talús corresponent al cas 3

També en la Taula 8 podem veure un resum dels paràmetres introduïts per aquests cas.

Taula 8 Resum dels paràmetres introduïts per aquest cas 3

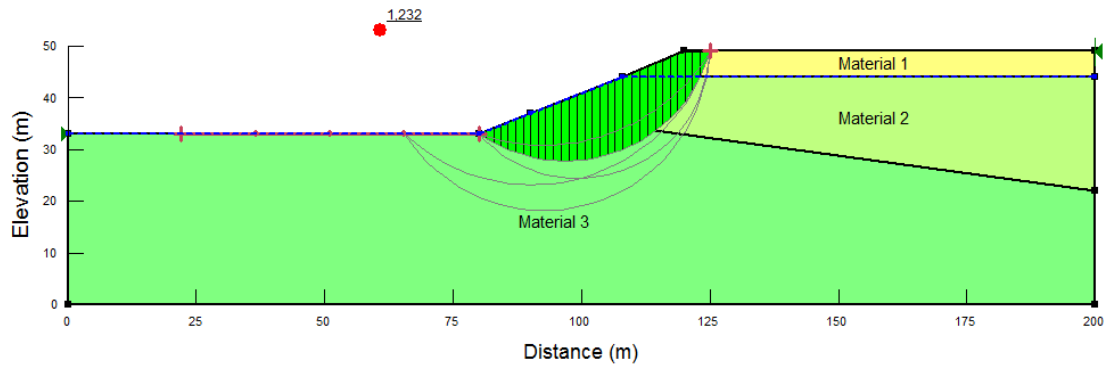
Parameter	Name	Material 1	Material 2	Material 3	Units
General					
Material model	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Drainage type	Type	Drained	Drained	Drained	-
Soil unit weight above p.l	γ_{unsat}				KN/m^3
Soil unit weight below p.l	γ_{sat}				KN/m^3
Parameters					
Young's modulus	E'	15000	15000	15000	KN/m^2
Poisson ratio	ν'	0,33	0,33	0,33	-
Cohesion	c'	20	25	30	KN/m^2
Friction angle	ϕ'	32	30	15	º
Dilatancy angle	ψ'	-	-	-	º
Flow					
Horizontal permeability	k_x	0,01	0,01	0,01	m/day
Vertical permeability	k_y	0,01	0,01	0,01	m/day

4.5.3 Anàlisi dels casos

➤ $s = 5 \text{ m}$

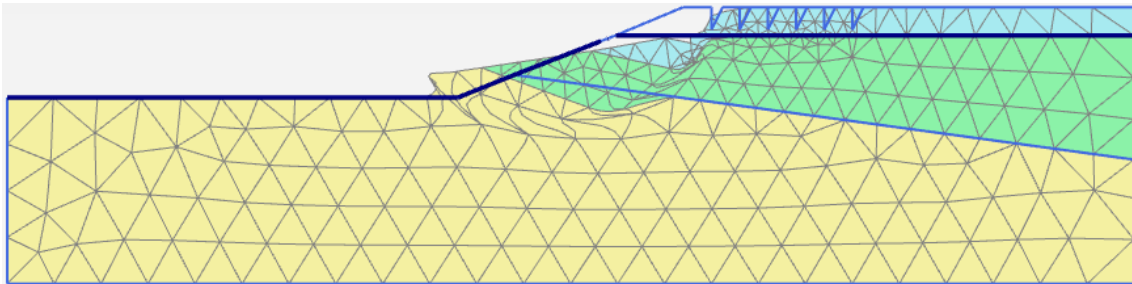
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

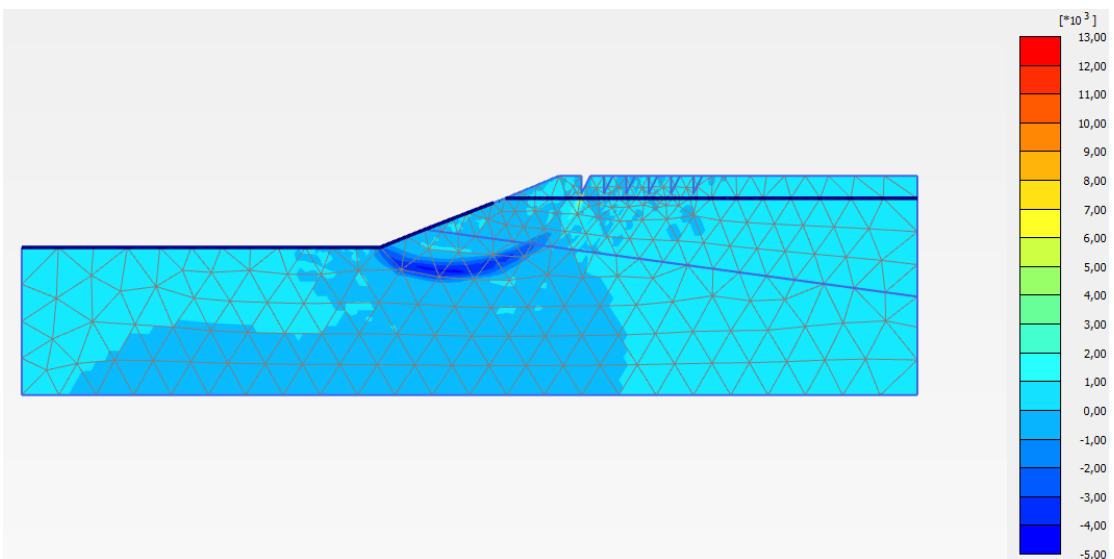
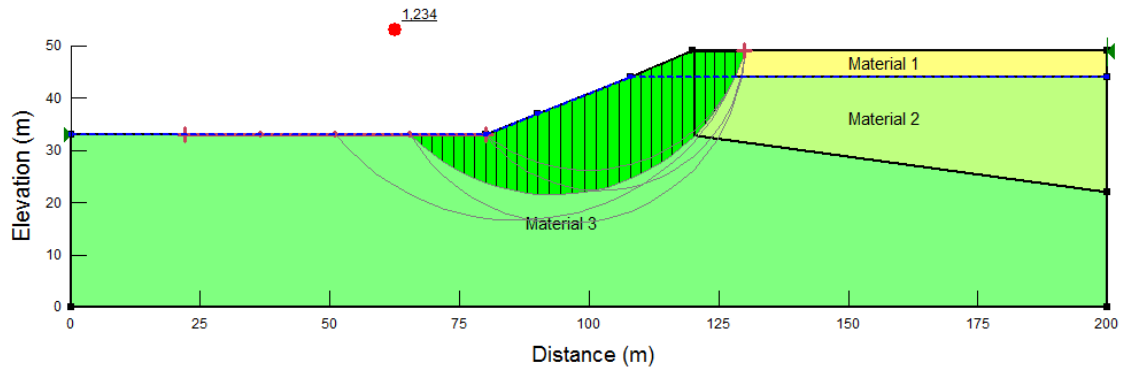


Figura 105 Cas 3. $s = 5$ metres. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

➤ $s = 10 \text{ m}$

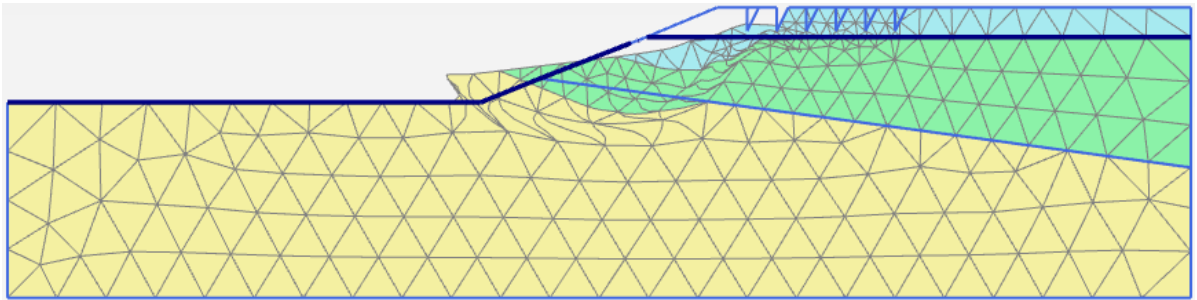
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

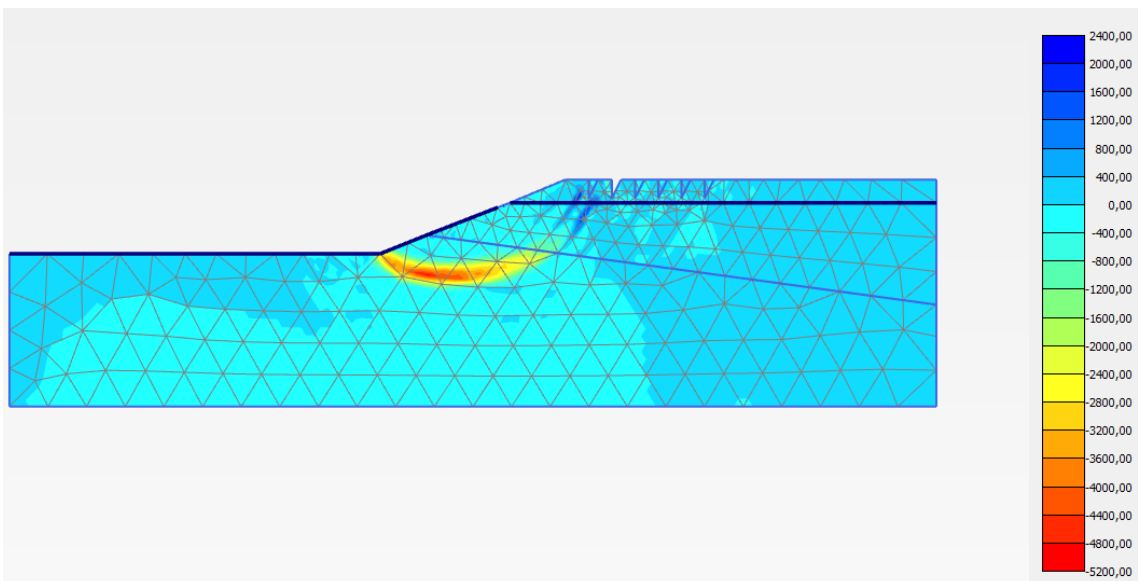
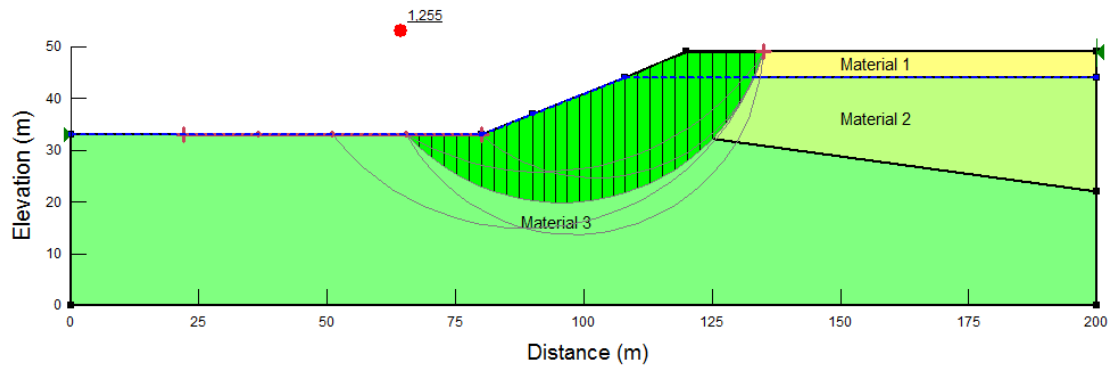


Figura 106 Cas 3. $s = 10$ metres. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

➤ $s = 15 \text{ m}$

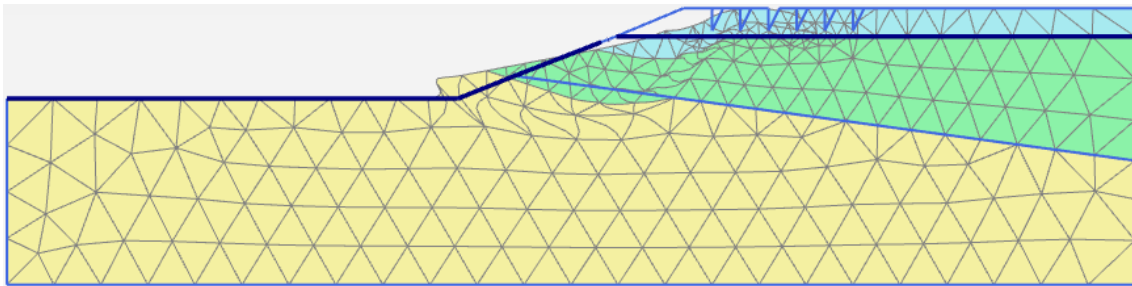
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

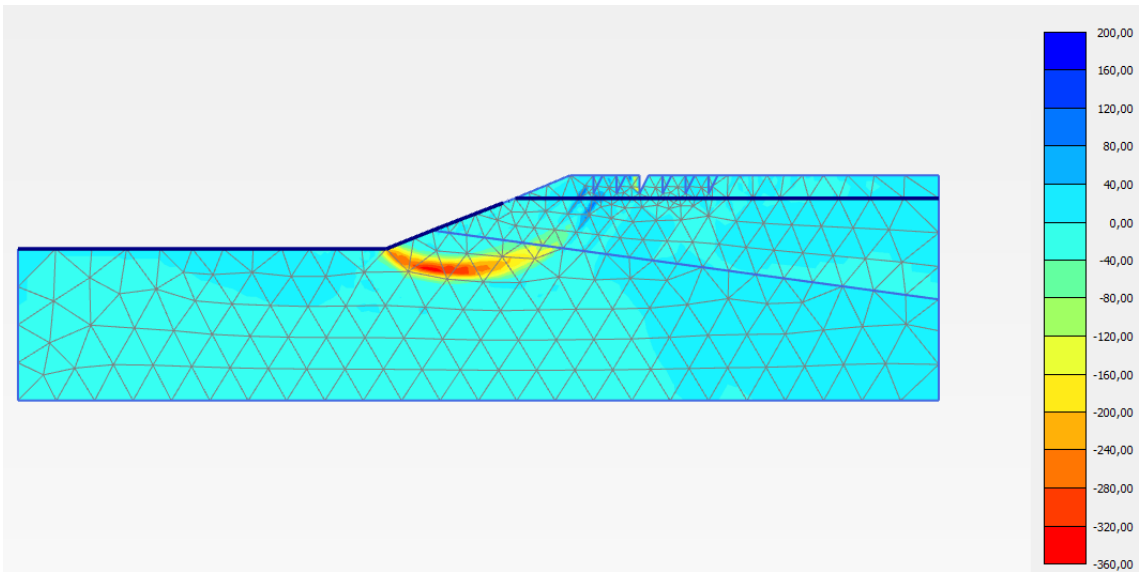
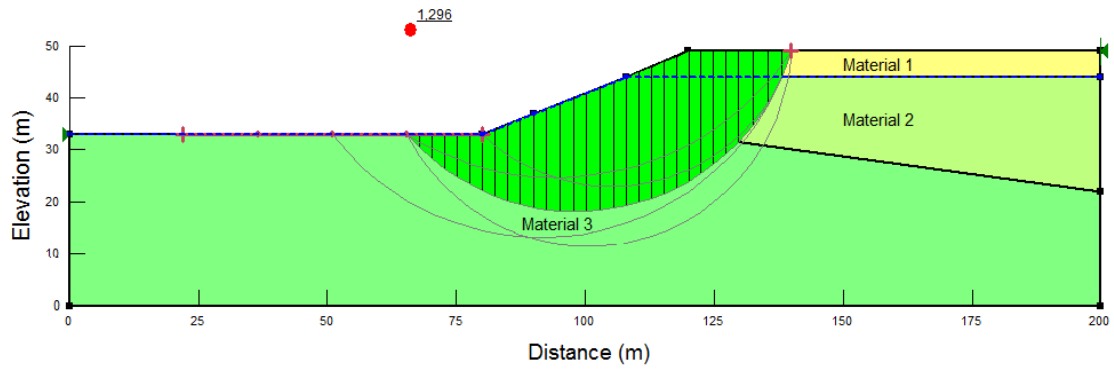


Figura 107 Cas 3. $s = 15$ metres. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

➤ $s = 20 \text{ m}$

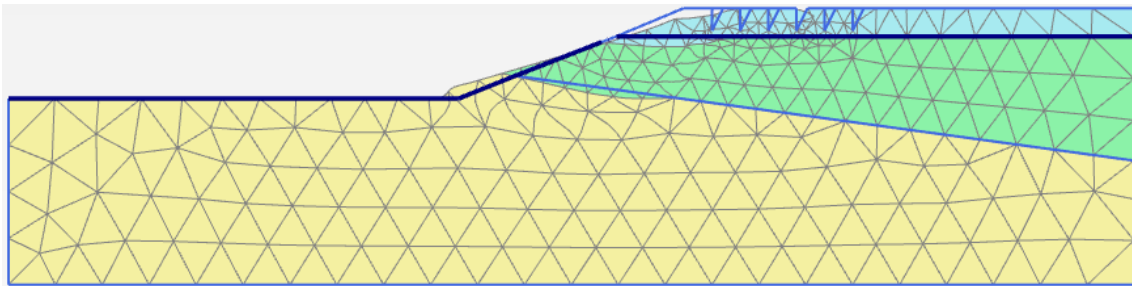
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

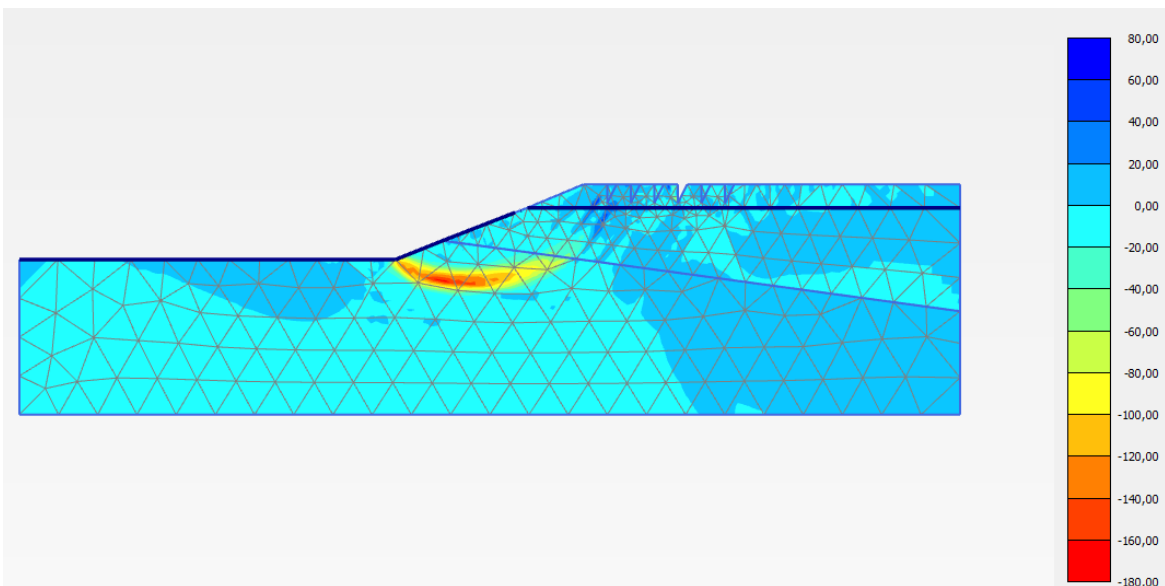
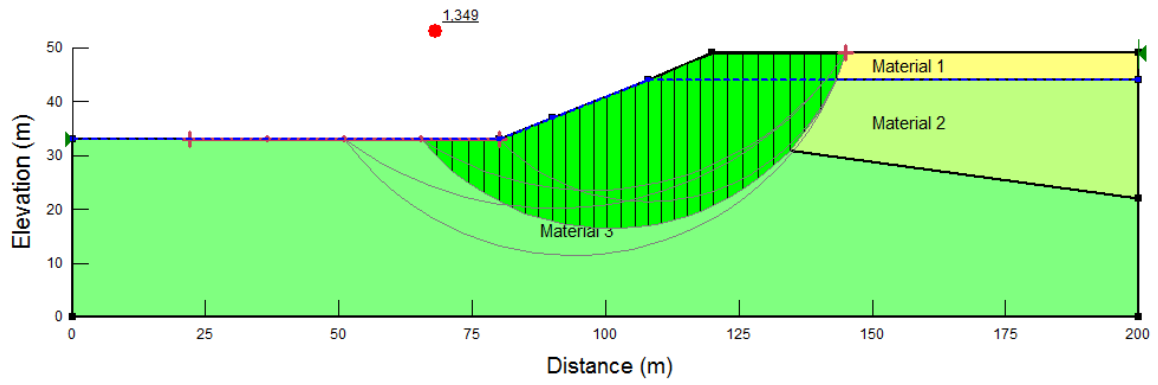


Figura 108 Cas 3. $s = 20$ metres. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

➤ $s = 25m$

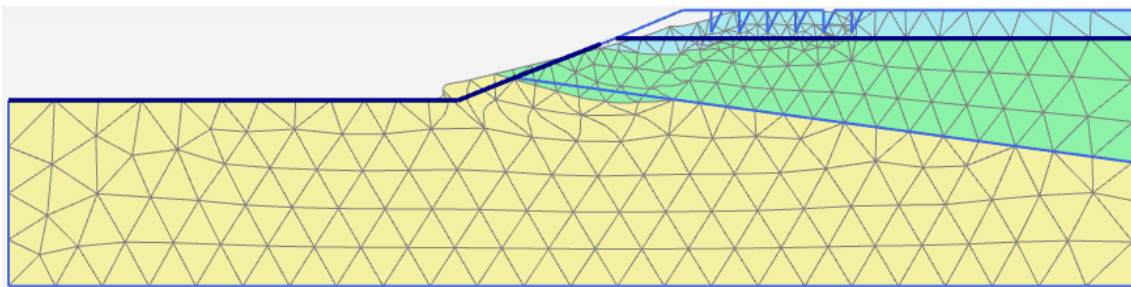
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

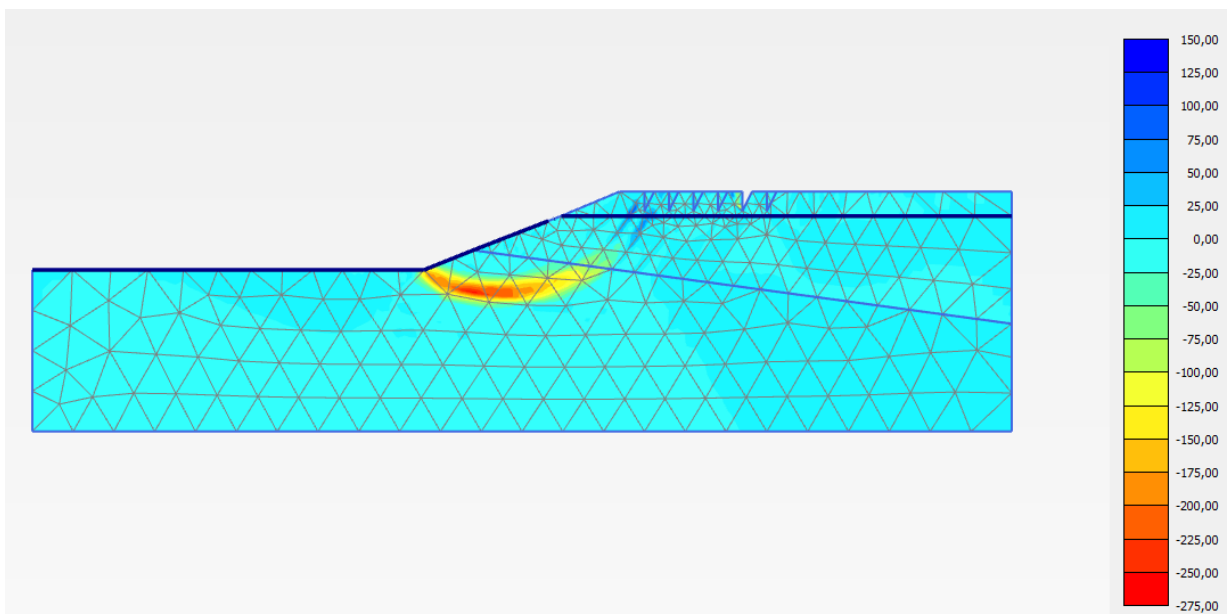
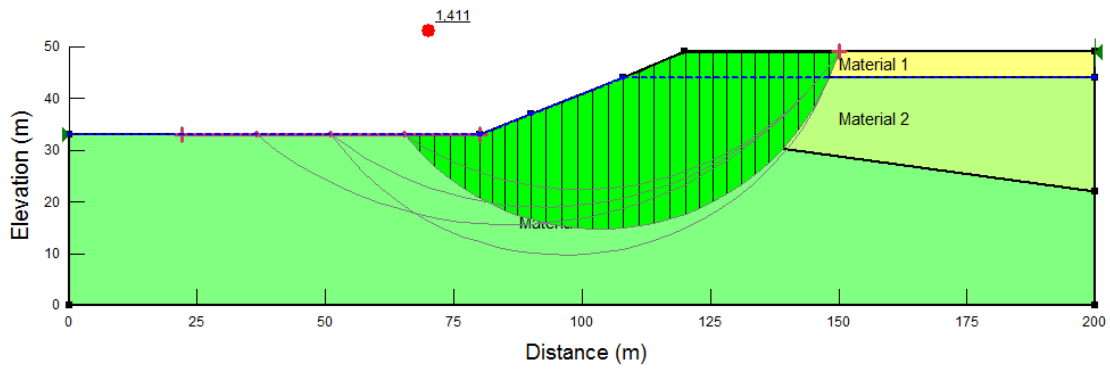


Figura 109 Cas 3. $s = 25$ metres. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

➤ $s = 30 \text{ m}$

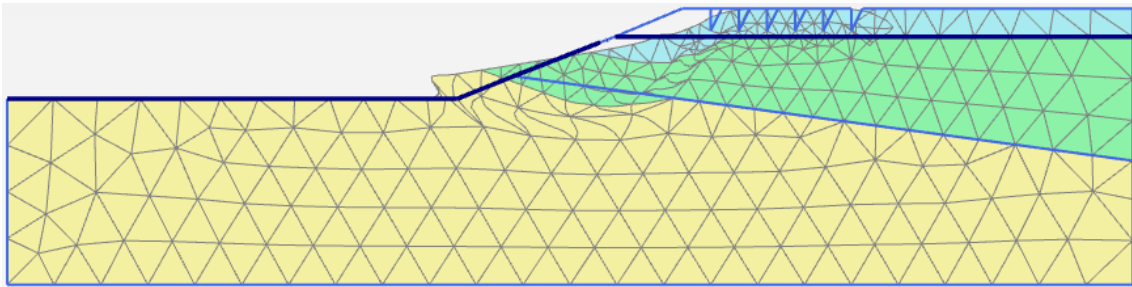
- GEO-SLOPE

(a)



- PLAXIS

(b)



(c)

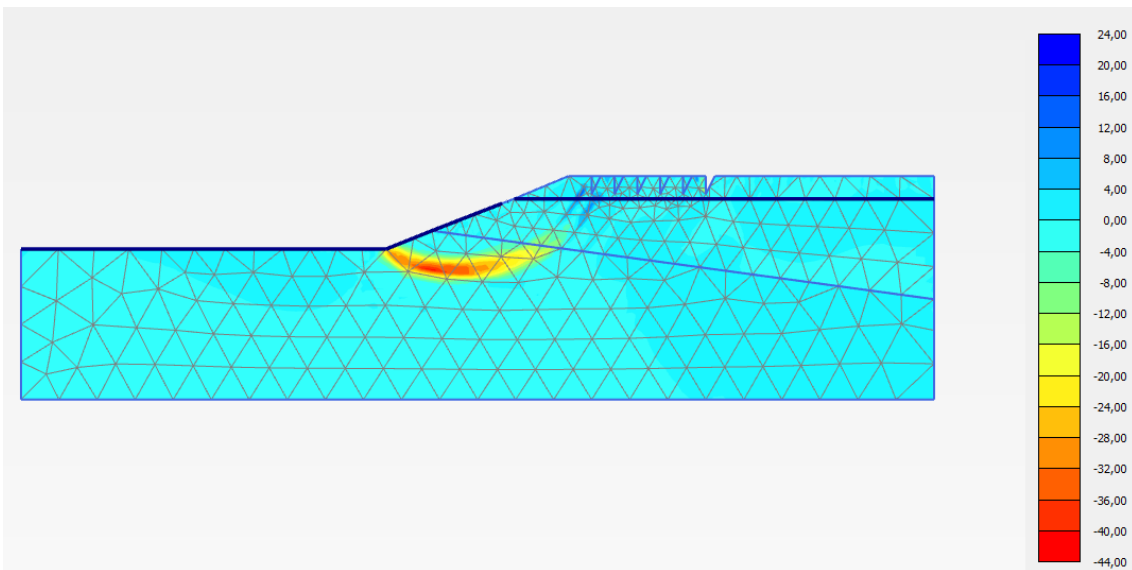


Figura 110 Cas 3. $s = 30$ metres. (a) Mecanisme de trencament. Programa GEO-SLOPE. (b) Deformació de la malla i (c) Deformació de tall. Programa PLAXIS.

5 ANÀLISI DE RESULTATS

En aquest cinquè capítol s'estudien els resultats dels casos per separat. Primer es resumeixen en unes taules tots els valors de factor de seguretat que hem obtingut en tots els cassos. Després mitjançant les gràfiques podem veure quina és la tendència dels factors de seguretat. Al sisè capítol, s'expliquen les conclusions pertinents corresponents a cada programa i en quins casos es recomana un o l'altre.

5.1 CAS 1: VARIACIÓ DE LA COTA DE LA LÀMINA D'AIGUA

Aquest primer cas és el que recull més iteracions perquè en un estudi comparatiu es detecta ràpidament la diferència dels resultats alhora d'executar-los amb les diferents variables.

Taula 9 Resum dels factors de seguretat dels 60 cassos del cas 1. Programes GEO-SLOPE i PLAXIS.

H=0m	GEO-SLOPE: Factor Seguretat				PLAXIS: Factor Seguretat			
[kPa]	12º	20º	30º	40º	12º	20º	30º	40º
18	0,927	1,142	1,45	1,829	1,158	1,514	1,983	2,524
27	1,207	1,454	1,758	2,136	1,466	1,855	2,345	2,914
36	1,487	1,751	2,069	2,445	1,76	2,168	2,695	3,289
H=2m	GEO-SLOPE: Factor Seguretat				PLAXIS: Factor Seguretat			
[kPa]	12º	20º	30º	40º	12º	20º	30º	40º
18	0,958	1,213	1,573	1,96	1,172	1,51	1,954	2,465
27	1,261	1,513	1,872	2,314	1,494	1,868	2,334	2,872
36	1,547	1,815	2,171	2,613	1,814	2,19	2,688	3,255
H=5m	GEO-SLOPE: Factor Seguretat				PLAXIS: Factor Seguretat			
[kPa]	12º	20º	30º	40º	12º	20º	30º	40º
18	1,114	1,414	1,838	2,306	1,292	1,657	2,115	2,663
27	1,463	1,76	2,183	2,703	1,661	2,053	2,55	3,114
36	1,803	2,109	2,529	3,048	2,022	2,43	2,945	3,563
H=8m	GEO-SLOPE: Factor Seguretat				PLAXIS: Factor Seguretat			
[kPa]	12º	20º	30º	40º	12º	20º	30º	40º
18	1,426	1,815	2,366	2,978	1,522	1,944	2,48	3,108
27	1,868	2,256	2,804	3,48	1,965	2,415	2,998	3,656
36	2,303	2,696	3,244	3,918	2,392	2,874	3,466	4,178
H=10m	GEO-SLOPE: Factor Seguretat				PLAXIS: Factor Seguretat			
[kPa]	12º	20º	30º	40º	12º	20º	30º	40º
18	1,738	2,22	2,899	3,646	1,702	2,161	2,753	3,417
27	2,271	2,751	3,429	4,262	2,201	2,706	3,326	4,069
36	2,775	3,282	3,959	4,792	2,693	3,203	3,878	4,63

Com s'ha pogut veure a la Taula 9 els factors de seguretat obtinguts pel programa PLAXIS són més grans que els obtinguts pel programa GEO-SLOPE. Només en el cas $H_w = 10$ metres que els valors són lleugerament més petits. Les gràfiques que tenim a continuació s'estudien els casos de manera que s'agrupen pels quatre casos d'angle de fricció diferents. Podem veure que un terreny quan el seu angle de fricció és més gran dona una major estabilitat i per tant obtenim valors de factors de seguretat més grans que quan tenim angles de fricció de 12° o 20° .

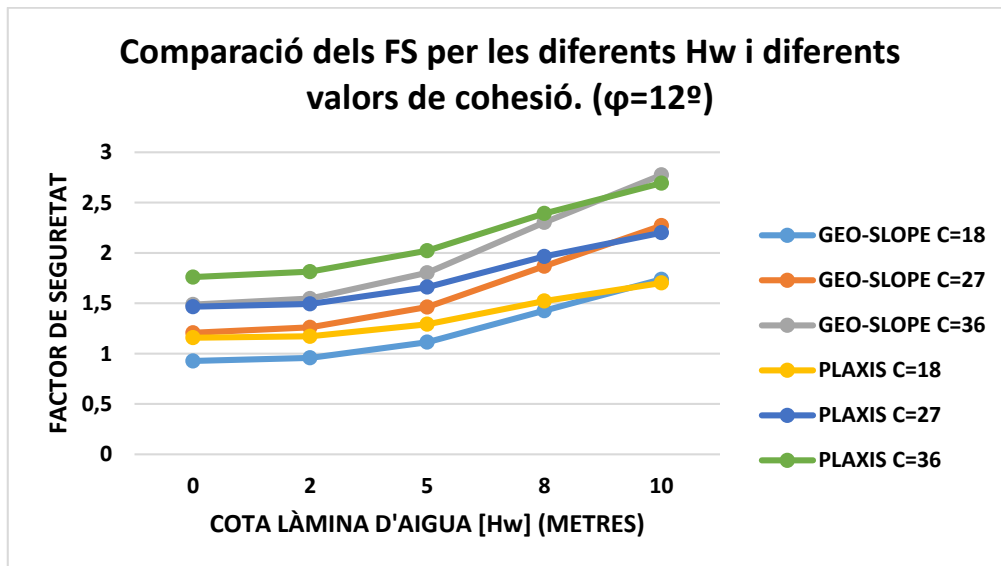


Figura 111 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i H_w . ($\varphi = 12^\circ$)

Si a més combinem un angle de fricció baix amb una fricció baixa obtenim els valors de factors de seguretat més baixos. Per tant la cohesió també actua de manera favorable en un talús si és més gran.

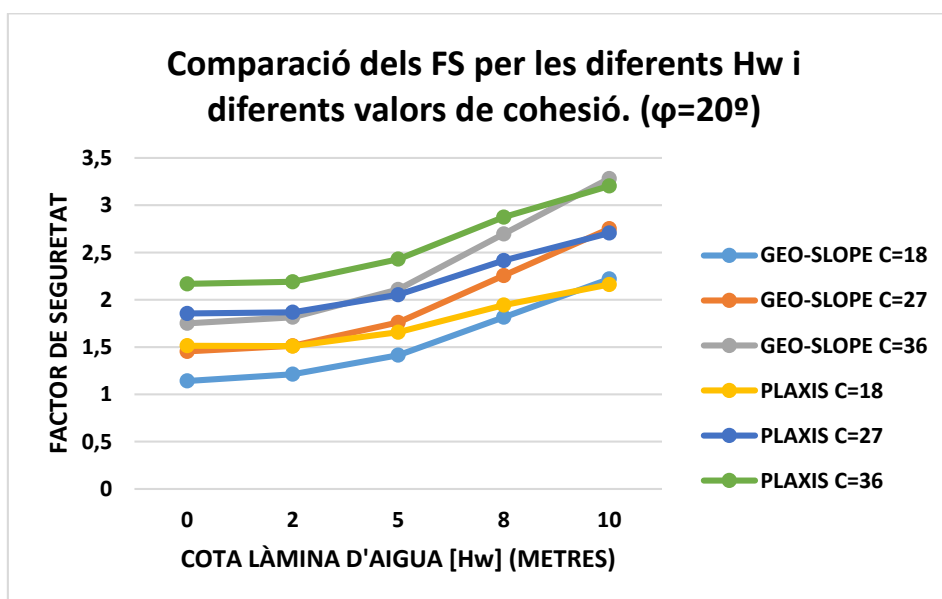


Figura 112 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i H_w . ($\varphi = 20^\circ$)

El que també s'observa és que quan tenim una cota de la làmina d'aigua a partir del cinc metres els valors de factors de seguretat obtinguts pels dos mètodes són similars, i això es deu a que depèn en gran part pel volum d'aigua que recolza sobre el talús provoca una empenta que fa que les forces s'equilibrin i per tant tinguem major seguretat.

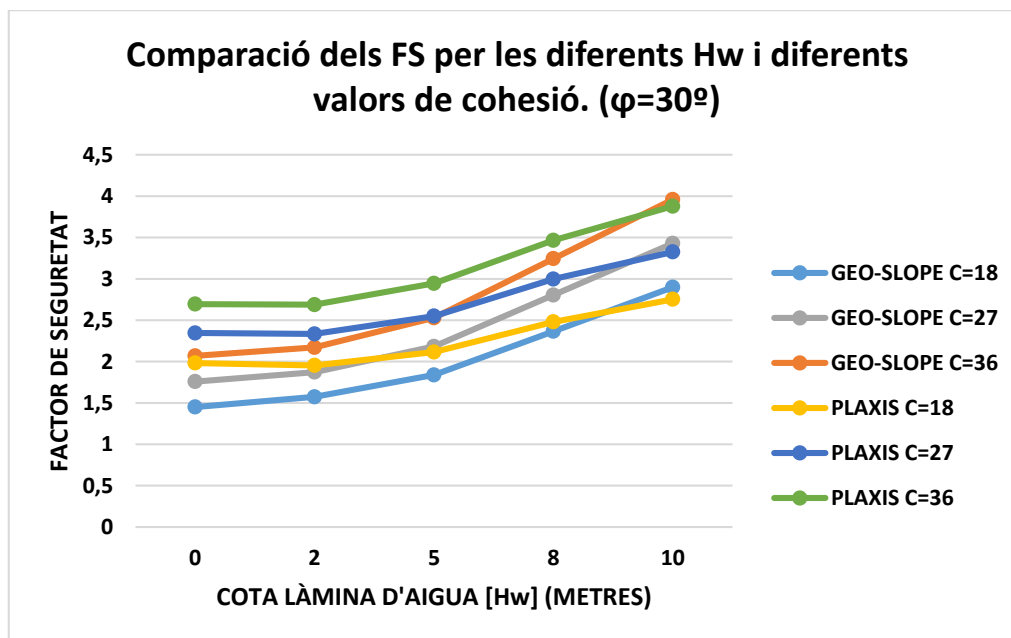


Figura 113 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i Hw. ($\varphi = 30^\circ$)

Utilitzant el mètode de Spencer pel cas d'equilibri límit, mètode del qual suposa que la inclinació de les forces de tall és constant a la superfície de trencament i per tant dona valors més petits de factors de seguretat i en canvi el mètode d'elements finits és més conservador.

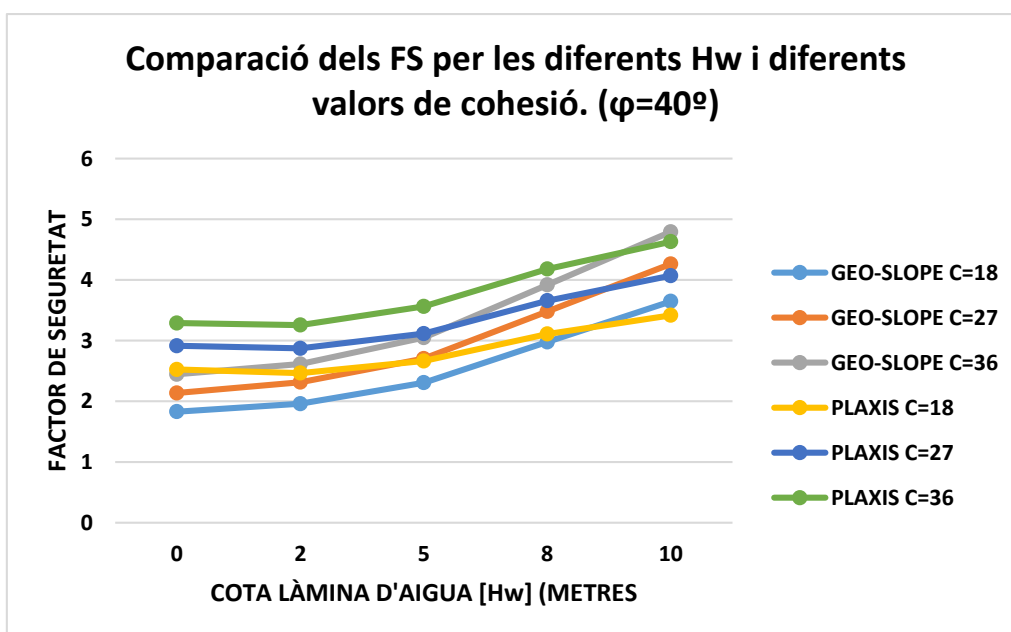


Figura 114 Comparació dels factors de seguretat pels diferents valors de cohesió i Hw. ($\varphi = 40^\circ$)

5.2 CAS 2: SÒLS ARGILOSOS SECS

En aquest segon cas, les variables de les quals depenen els factors de seguretat són les variacions de les cohesions. Tal i com podem veure a la taula, per cada valor de cohesió que definim pel material 1 el combinarem per sis valors de cohesions pel material 2 que dependran de la relació entre ells, si és la meitat, el doble, el triple, etc... Les dues taules que tenim a continuació (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** i **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) pertanyen a totes els resultats que s'han obtingut dels factors de seguretat pels dos programes.

Taula 10 Resum dels factors de seguretat dels 24 cassos del cas 2. Programa GEO-SLOPE

GEOSLOPE		C1=C2			C1<<C2	
Valors de C1	0,5	1	1,5	2	2,5	3
13,5	6,75	13,5	20,25	27	33,75	40,5
FS	0,545	0,88	1,251	1,622	1,951	2,132
18	9	18	27	36	45	54
FS	0,727	1,173	1,668	2,162	2,601	2,843
22,5	11,25	22,5	33,75	45	56,25	67,5
FS	0,909	1,467	2,085	2,703	3,251	3,553
27	13,5	27	40,5	54	67,5	81
FS	1,091	1,76	2,502	3,243	3,901	4,264

Podem concloure de les taules, que els factors de seguretat obtinguts en el programa GEO-SLOPE creixen des de la relació 0,5 fins 3, mentre que en els factors de seguretat obtinguts pel programa PLAXIS creixen des de 0,5 i a partir de 1 ja romanen constants. Però el que sí que és el mateix per els dos casos és que el talús és molt més segur quan la cohesió del material és el doble o el triple que la cohesió del material 1. Quan la cohesió és més alta, les argiles no drenades actuen com un paquet i no es col·lapsen i per tant el factor de seguretat és més gran.

Taula 11 Resum dels factors de seguretat dels 24 cassos del cas2. Programa PLAXIS.

PLAXIS		C1=C2			C1<<C2	
Valors de C1	0,5	1	1,5	2	2,5	3
13,5	6,75	13,5	20,25	27	33,75	40,5
FS	0,8346	1,037	1,051	1,052	1,052	1,052
18	9	18	27	36	45	54
FS	1,06	1,241	1,264	1,265	1,266	1,266
22,5	11,25	22,5	33,75	45	56,25	67,5
FS	1,197	1,442	1,472	1,472	1,475	1,475
27	13,5	27	40,5	54	67,5	81
FS	1,331	1,633	1,676	1,676	1,676	1,677

En aquesta taula podem veure millor com els factors de seguretat en el cas del programa PLAXIS a partir de que la cohesió del material 2 és més gran, a partir de que la relació C2/C1 és més gran que 1, ja s'estabilitza i és constant.

Això es degut a que tal i com podem veure en la Figura 80, Figura 81 i Figura 82, la superfície de trencament és la mateixa, per tant els factors de seguretat seran quasi iguals i la superfície de trencament passarà només pel material 1. En canvi en el cas del programa GEO-SLOPE la superfície de trencament definida pel mètode de Bishop que imposa una forma circular és molt més gran.

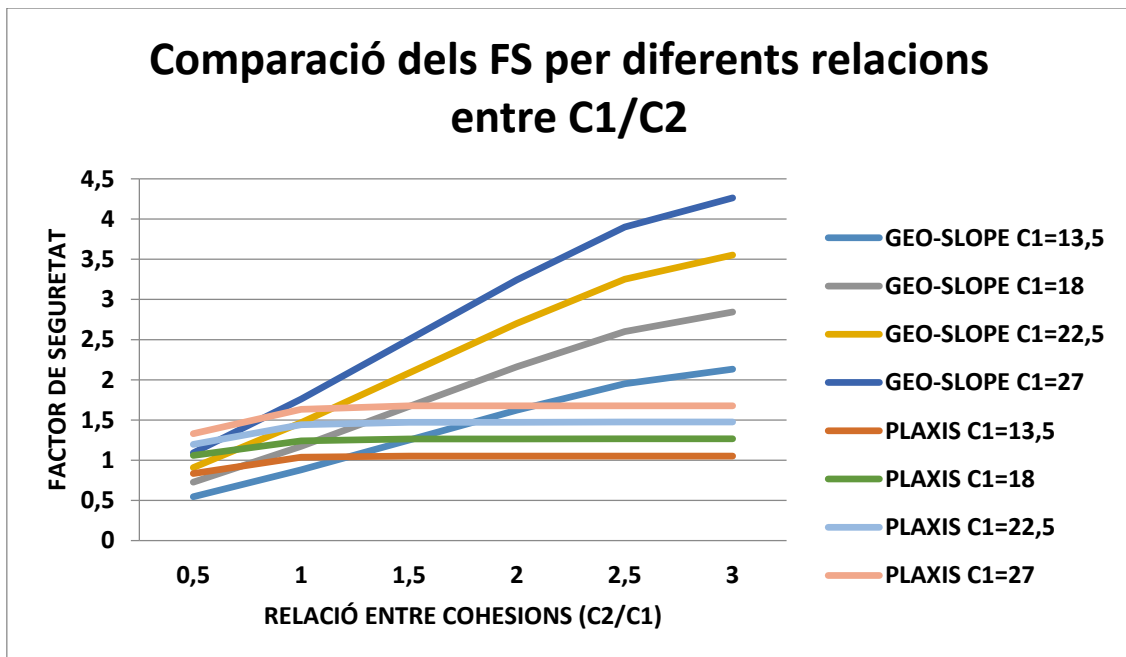


Figura 115 Comparació els factors de seguretat de tots els casos.

A la gràfica que tenim a continuació podem observar com els factors de seguretat són molt similars i mantenen el pendent de la recta lleugerament creixent ja que quan tenim més cohesió el terreny és més estable. Només en el cas d'una cohesió del material 2 molt més gran que la del material 1 els valors de FS són molt més grans de fins a 4 en el cas de C1=27kPa.

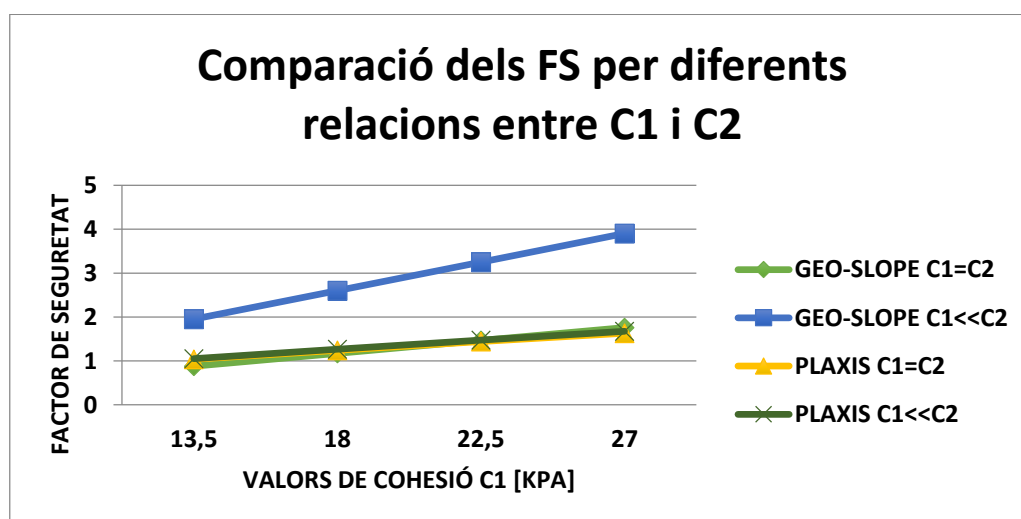


Figura 116 Comparació els factors de seguretat per els diferents valors de C1

5.3 CAS 3: ESQUERDES A LA PART SUPERIOR DEL TALÚS

En aquest tercer cas, només té una variable d'estudi que és la distància *S* que separa la part on es troba l'esquerda i el canvi de pendent del talús per la part superior. Tal i com es pot veure a la taula següent, els factors de seguretat obtinguts en ambdós casos són similars. Tot i així, a la gràfica que està inclosa a la Figura 117 podem veure que cadascun dels programes agafa una tendència diferent.

Taula 12 Resum dels factors de seguretat dels 12 cassos del cas 3. Programes GEO-SLOPE i PLAXIS.

S	Factor de Seguretat	
	GEOSLOPE	PLAXIS
5	1,232	1,332
10	1,234	1,324
15	1,255	1,322
20	1,296	1,325
25	1,349	1,325
30	1,411	1,326

El factors de seguretat que s'han obtingut amb el programa GEO-SLOPE i per tant utilitzen el mètode d'equilibri límit van sent valors més grans, i per tant més segurs, a mesura que la distància és més gran. En canvi en el cas del PLAXIS tenim una tendència del factor de seguretat constant. Aquestes dues tendències són conseqüència de que en el cas del GEO-SLOPE la superfície de trencament depèn de la situació de l'esquerda i per tant tindrem diferents models de trencament del terreny. En canvi, en el cas del PLAXIS la superfície de trencament és sempre la mateixa ja que no trenca per on passa l'esquerda. Però cal fixar-se també que el PLAXIS és capaç de detectar els trencaments que es produeixen dins les esquerdes tal i com es mostra a les Figura 107, Figura 108 i Figura 109. En cadascuna de les figures observem un petit núvol de color groc el qual ens indica que les deformacions de tall són majors que les altres.

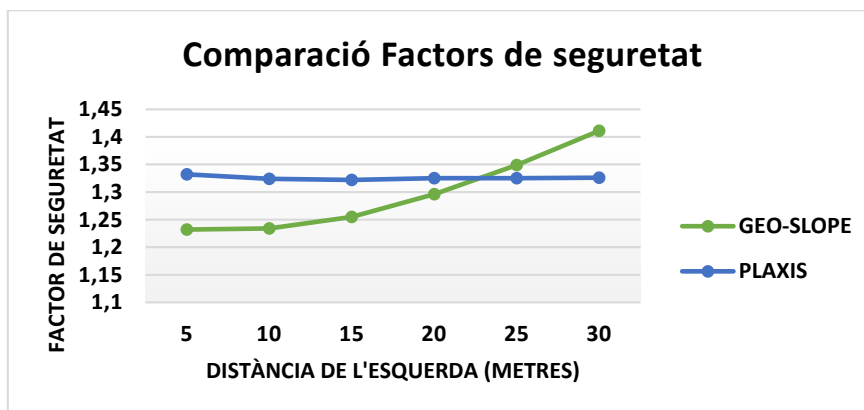


Figura 117 Comparació dels factors de seguretat del cas 3.

6 CONCLUSIONS

En la present tesina s'ha realitzat un estudi comparatiu entre dos mètodes de càlcul mitjançant dos programes i per tres situacions que es donen habitualment en talussos. Inicialment es varem proposar uns objectius els quals s'han complert i s'han obtingut uns resultats on s'han extret les següents conclusions. Primer es comentaran les conclusions cas a cas , després dels programes i finalment del conjunt de tot l'estudi.

En el primer cas s'ha plantejat un talús homogeni, que està format per un sol material i el qual s'ha anat variant la cohesió, l'angle de fricció i l'altura de làmina d'aigua. Un cop obtinguts tots els factors de seguretat, podem concloure que a mesura que incrementem el valor cohesió i el valor d'angle de fricció el terreny és més estable per què dona valor de factor de seguretat més grans. Però si fixem les propietats intrínseques del terreny i mirem com varien els casos variant només la cota de làmina d'aigua, observem que el talús és molt inestable quan la cota és de zero o dos metres, mentre a cotes altes és estable. Això es degut principalment a que tot el volum d'aigua crea una empenta sobre el terreny que el fa segur i s'equilibra amb la força pes que exerceix el talús. Si fem una comparació dels dos programes, podem veure com els valors del factor de seguretat en GEO-SLOPE són lleugerament inferiors a cotes de la làmina d'aigua baixes. Però ja a la cota 5, 8 i 10 els factors són gairebé iguals inclús a cota 10 els factors de seguretat de GEO-SLOPE són superior.

En el segon cas tenim dues capes d'argiles les quals s'ha anat variant el valor de cohesió de la capa inferior per veure com afectava a l'estabilitat. En ambdós casos s'ha donat que a partir que la cohesió de la capa inferior és 1,5 cops més gran que la capa superior el mecanisme de trencament ja només es produeix a la capa superior. En aquest cas el mètode d'equilibri límit utilitzat és Bishop que permet mecanismes de trencament no circular. En els casos on la relació entre cohesions és inferior a 1,5 els valors de factor de seguretat dels dos mètodes són similars, mentre que a partir de d'aquesta relació fins a arribar que sigui el triple, els factors de seguretat a PLAXIS es mantenen constants, ja que el programa utilitza la mateixa superfície de trencament que calcula i és la mínima.

En el tercer cas, s'ha estudiat l'efecte de les forces de tracció provocades per les esquerdes situades a la part alta del talús. La única variable que s'estudia és la distància de l'esquerda respecte el punt més alt dels talús. Les tres capes que formen el talús no varien els seus paràmetres. Per aquest últim cas hem posat el nivell freàtic perquè no afectes a la capa que conté les esquerdes. D'aquesta manera les possibles pressions de porus que es produeixen amb

l'aigua no les tenim en compte. Aquest darrer cas dona uns valors de seguretat amb una tendència diferent. Mentre que PLAXIS manté el seu factor de seguretat constant, GEO-SLOPE augmenta el seu factor de seguretat a mesura que la distància entre l'esquerda i el talús és més gran. Les deformacions de la malla també són més suaus a mesura que la distància augmenta. Cal fixar-nos que PLAXIS detecta les deformacions de tall dins les esquerdes. Dins d'aquestes es produeixen petites falles que fan desequilibrar les forces.

El mètode d'Elements Finitos ofereix un mecanisme de trencament automàtic que busca la carrega límit que suporta el terreny tenint en compte el límit tant inferior com superior de l'anàlisi. Això és una avantatge comparat amb el mètode d'equilibri límit on mitjançant el mètode de la quadrícula o la generació de superfícies de trencament a l'atzar s'obté el cas límit. A més amb el mètode d'equilibri límit és necessari identificar la forma de la superfície de trencament, ja sigui circular o no circular, abans d'iniciar el procediment. Ja que s'han obtinguts valors de seguretat que en alguns casos les diferències són més grans, es recomana que per realitzar l'estudi d'estabilitat d'un talús s'utilitzin ambdós programes.

6.1 FUTURES LÍNIES DE TREBALL

Plantejar-se un estudi comparatiu entre dos programes comprèn un ventall molt gran de possibilitats. La present tesina ha combinat 2 programes amb 3 models i fins a 90 casos diferents de variables com la cohesió, l'angle de fricció i la geometria del terreny. La quantitat de programes geotècnics que hi ha actualment al mercat és molt gran. Igual que la infinita combinació de casos que ens trobem al terreny. En conseqüència, són molts els casos que no han sigut emprats en aquest estudi però que serien d'interès per millorar la informació sobre els programes i els seus resultats.

També, es pot plantejar realitzar estudis comparatius amb variables de casos reals per poder verificar quin és el marge d'error amb el que s'està treballant amb els programes a l'hora de calcular el factor de seguretat.

Realitzant diversos estudis comparatius, podrem trobar unes millores en els mètodes de càlcul i en els software dels programes que ens permetin minimitzar la incertesa en els càlculs del factor de seguretat.

7 REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

Alonso,E.; Pinyol,N., 2009. *Slope stability under rapid drawdown conditions*, Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya.

Alonso, E., 1989. Anàlisis de la estabilidad de taludes.Casos simples. "*Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales*", Sociedad Española de Geomorfología(Monografía Nº3), pp 97-118.

Alonso, E., 1989. Mètodos generales de equilibrio límite. "*Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales*", Sociedad Española de Geomorfología. Monografía Nº3, pp.119-166.

Atalla, N., Malkawi,A. & Yamin,M., 2008. Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach. *Bull Eng. Geol. Environ.*, Volum 67, pp. 471-478.

Ayala Carcedo, F.J., Andreu Posse, F.J., 2006. *Manual de Ingeniería de Taludes.*. Madrid. Instituto Geológico Minero de España. pp 456

Bishop, A., 1955. *The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes*. Geotechnique Nº5: 7-17: .

Blogdeenergia/carreteras, 2009.

Available at: <https://blogdeenergia.wordpress.com/tag/carreteras/>

Carol, I., 2013. *Apunts de Mecànica de Roques. Tema II, Roca matriz. Comportamiento mecanico*, Barcelona: Departament d'Enginyeria del terreny, Cartografia i Geofísica.

Celigüeta, J., 2011. *Métodos de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. Cuarta (pp.15-26) ed. San Sebastián,Gipuzkoa: Tecnun.Campus Tecnológico de laUniversidad de Navarra. Unicopia C.B..

Das, B. M., 2013. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. 4ta ed. s.l.:Thompson,Learning Nº:1:339-386.

GEO-SLOPEInternational, 2013. *Manual of Stability Modeling with SLOPE/W*. Carlgary, Alberta, Canada.

González, M., 2010. *Apunts de Mecànica del sòl i de les roques. Tema 8-Criteris de trencament.Resistència al tall dels sòls. Els assajos de tall directe i triaxial.*, Alacant: Universitat d'Alacant.

Hill, R., 1950. *The Mathematical Theory of Plasticity*, London, U.K.: Oxford University Press.

Janbu, N., 1956. *Slope stability computations in embankments dam engineering*. Geotechnique ed. : Nº17:234-267.

Lambe, W., Whitman, R., 1969. *Soil Mechanics*. s.l.: John Wiley & Sons. Nº 2: 371-393.

Nieto, A., Camacho, J.F. & Fernando, E., 2009. *Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening soil en suelos arcillosos*, Medellín pp 77-87: Revista Ingenierías Universidad de Medellín.

Ortuño, L., 2003. *Calculo de la Estabilidad de Taludes en Suelos*. Curso sobre Taludes en Obras Lineales ed. Madrid: INTEVIA.

PLAXIS, 2014. *Manual of Plaxis Materials model manuals*, Calgary, Alberta, Canada.

PLAXIS, 2014. *Manual of Plaxis Scientific manual*, Calgary, Alberta, Canada.

Ramírez, P. & Alejano, L., 2004. *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Primera ed. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. pp 82-219

Sanhueza, C. & Rodríguez, L., 2013. *Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales*. Volumen 12 Nº1 ed. Santiago de Chile: Revista de la Construcción.

Smith, I. G., 1982. *Programming the finite element method*, Chichester, UK: Second Edition. John Wiley & Sons.

Spencer, E., 1967. *A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces*. s.l.: Geotechnique Nº 17:11-26.

Zhu, D.Y., Lee, C.F. & Jiang, H.D., 2003. *Generalised framework of limit equilibrium method for slope stability analysis*, : Geotechnique 53 Nº4:377-396.

ANNEX 1: DESPLAÇAMENTS TOTALS

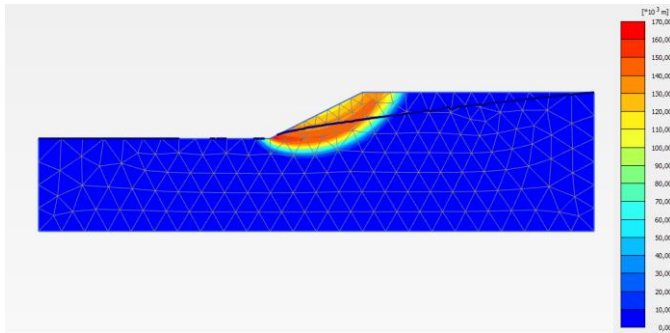
En aquest Annex trobem els desplaçaments totals que s'han obtingut en tots els casos. Són figures obtingudes amb el programa PLAXIS. Podem observar com els desplaçaments majors estan o sobre la línia de trencament o molt propers. Aquestes figures ens donen una idea molt aproximada del volum de terra que es mou quan es produeix el trencament i poden utilitzar-se alhora de plantejar-se mesures correctores o preventives al terreny per saber quina zona serà la més afectada.

1. CAS 1: Variació de la cota de la làmina d'aigua

➤ $H_w=0$ metres

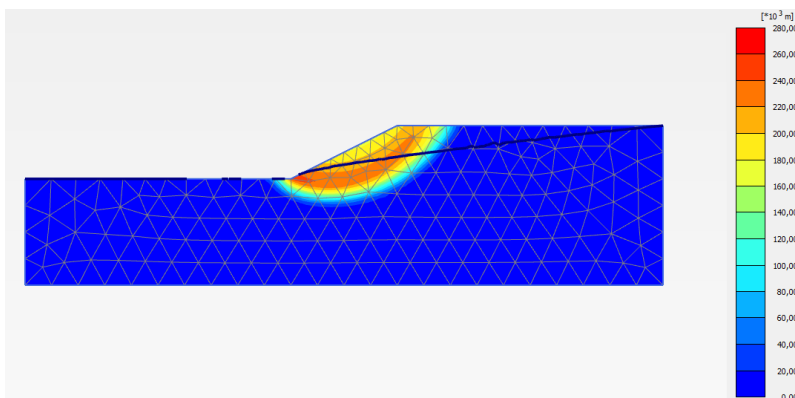
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

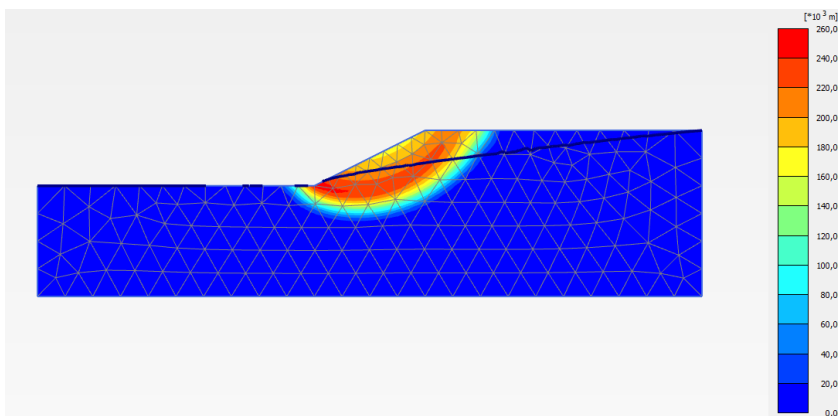
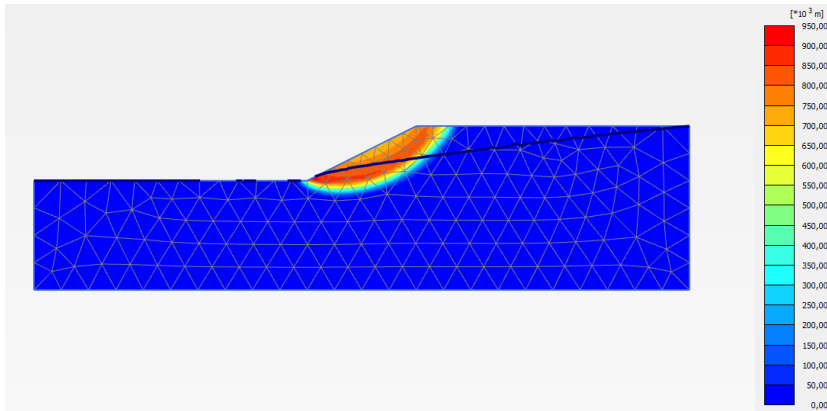


Figura 118 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

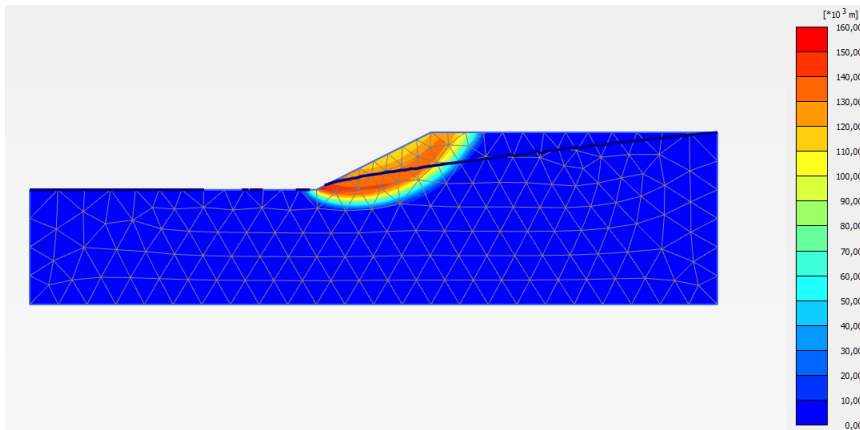
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

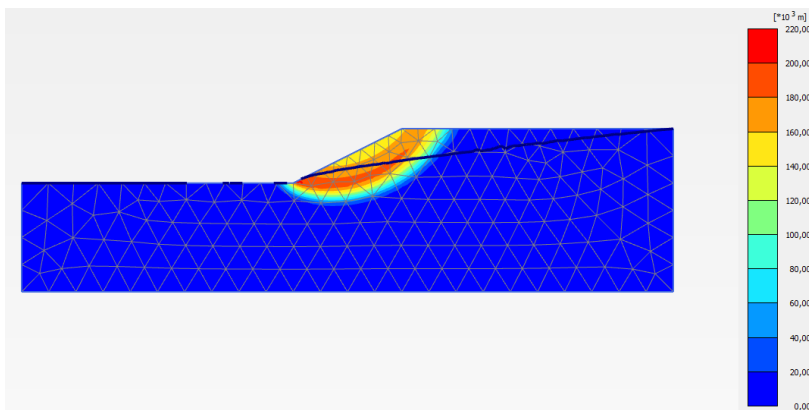
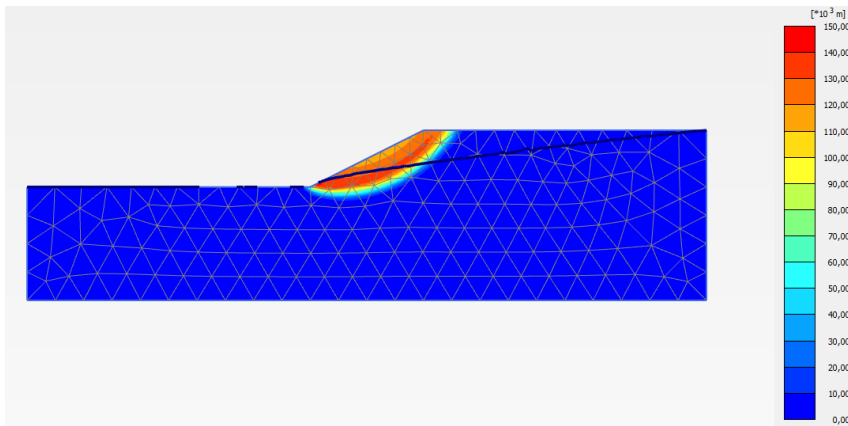


Figura 119 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

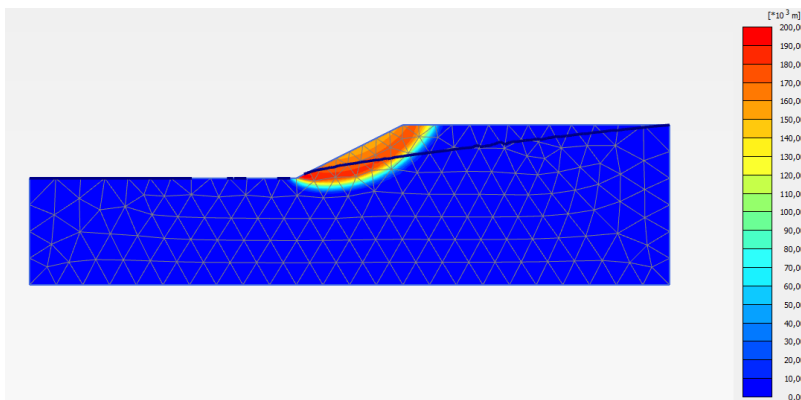
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

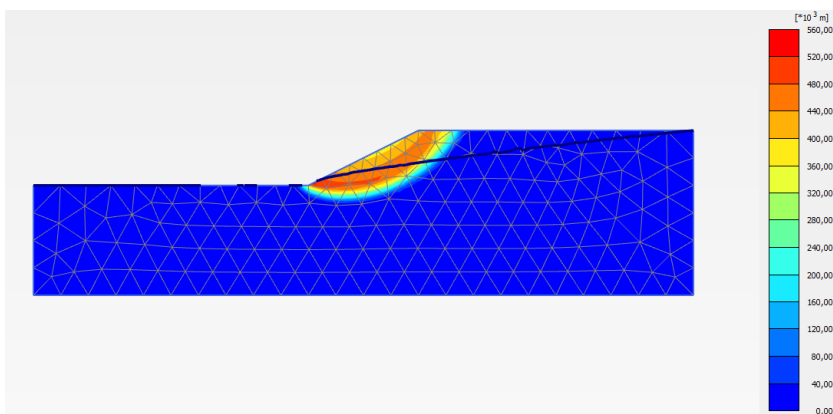
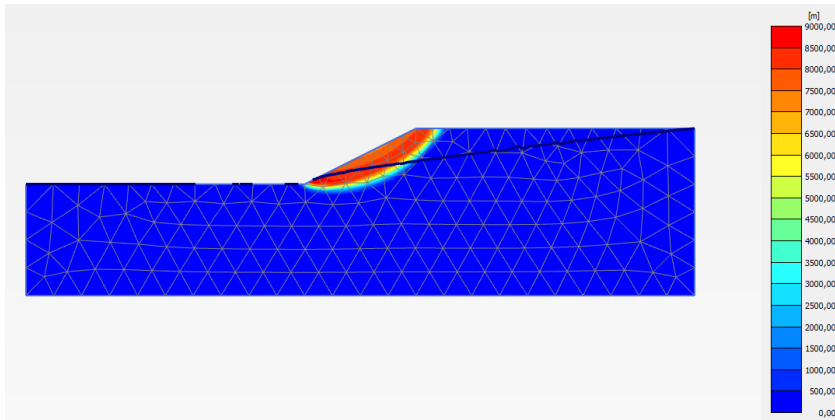


Figura 120 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

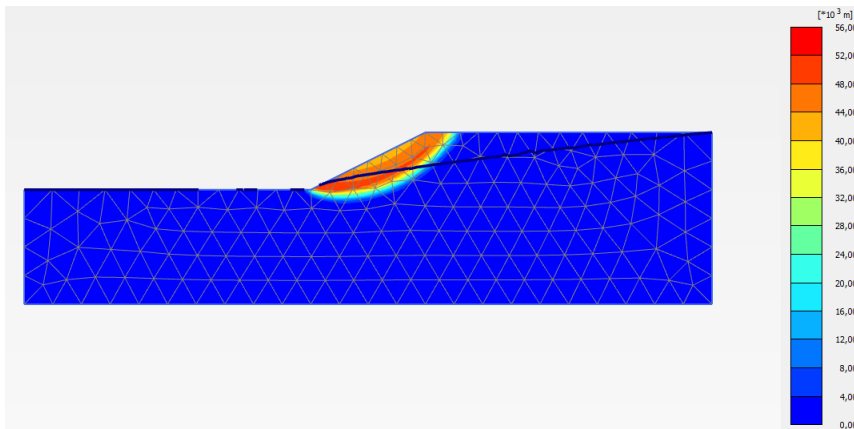
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

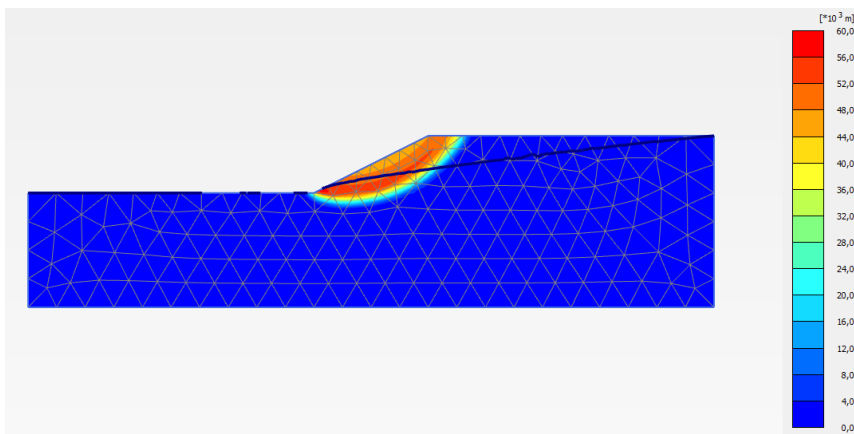
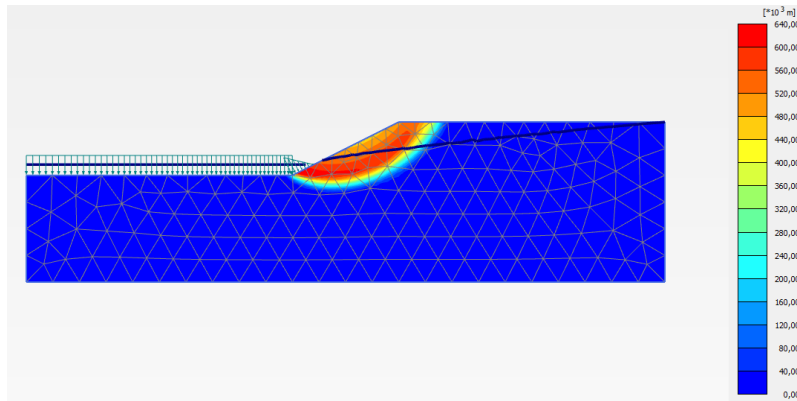


Figura 121 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

➤ Hw=2 metres

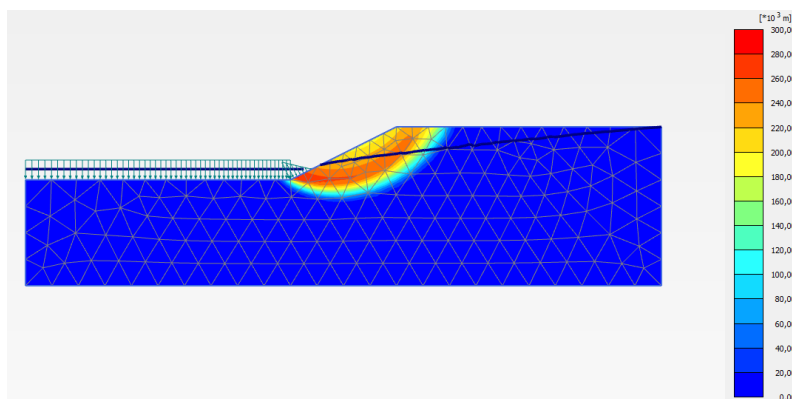
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

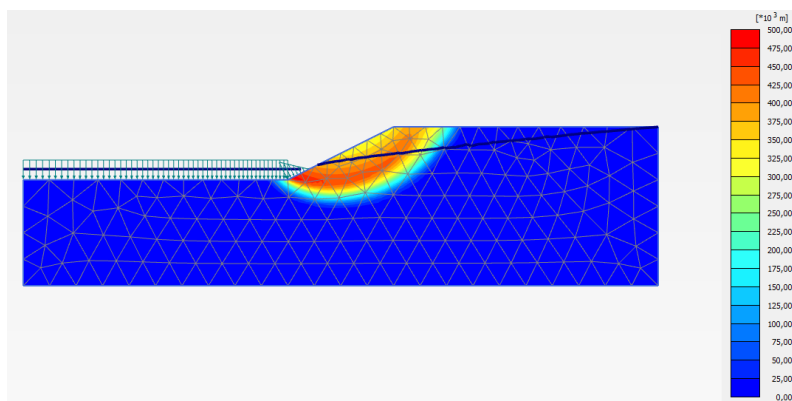
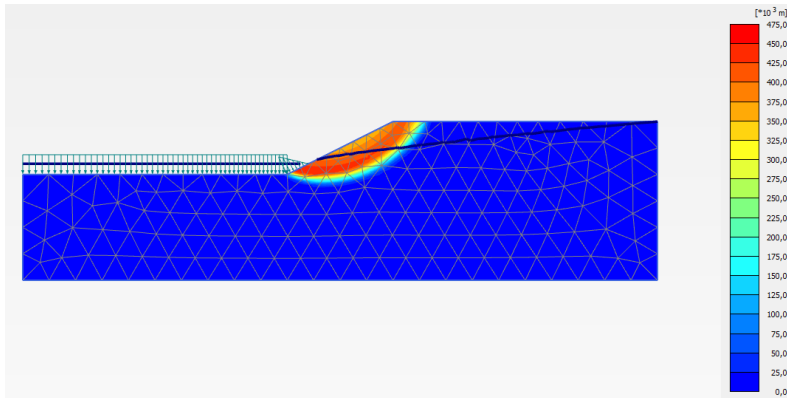


Figura 122 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

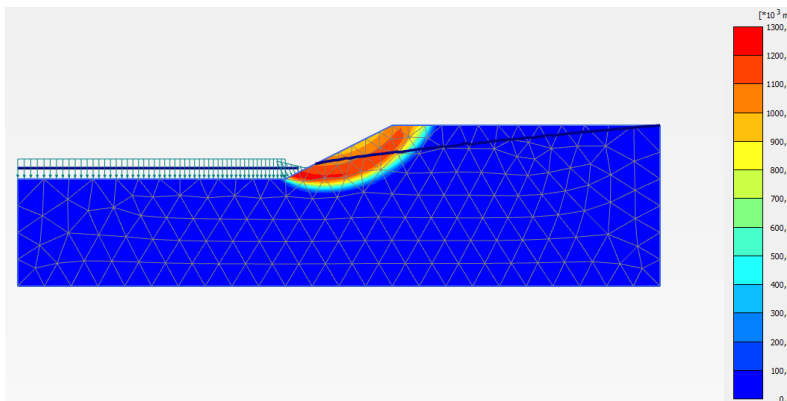
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

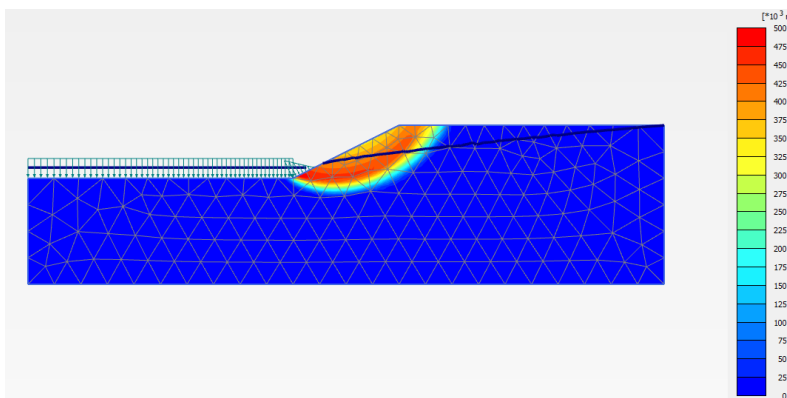
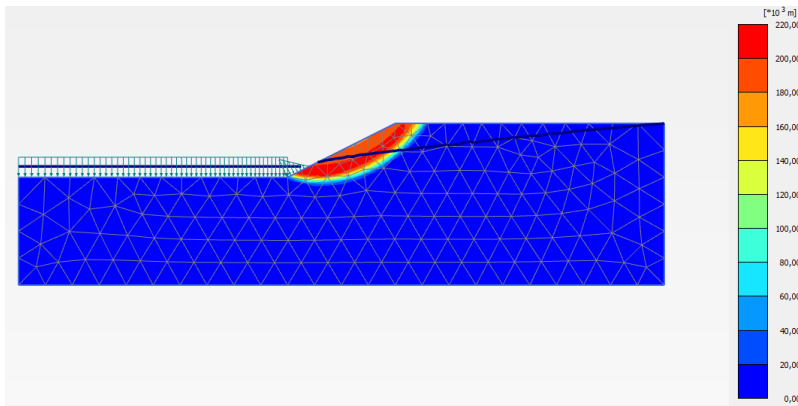


Figura 123 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

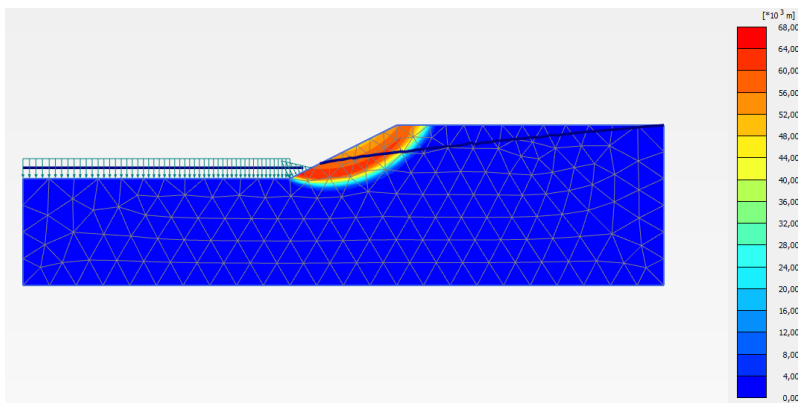
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

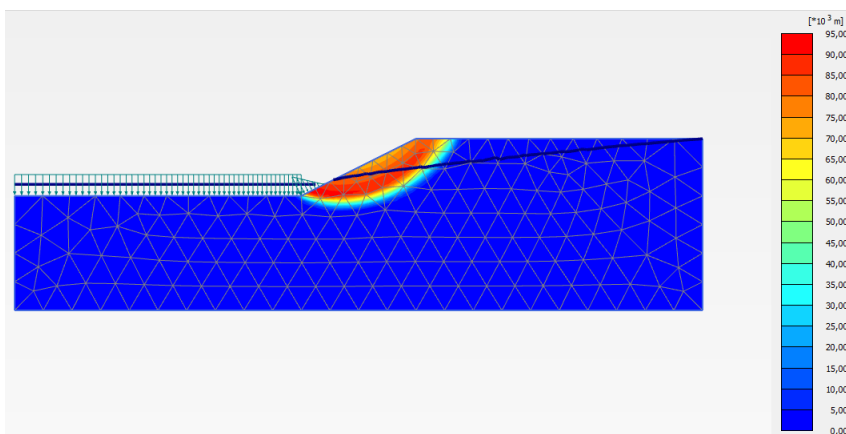
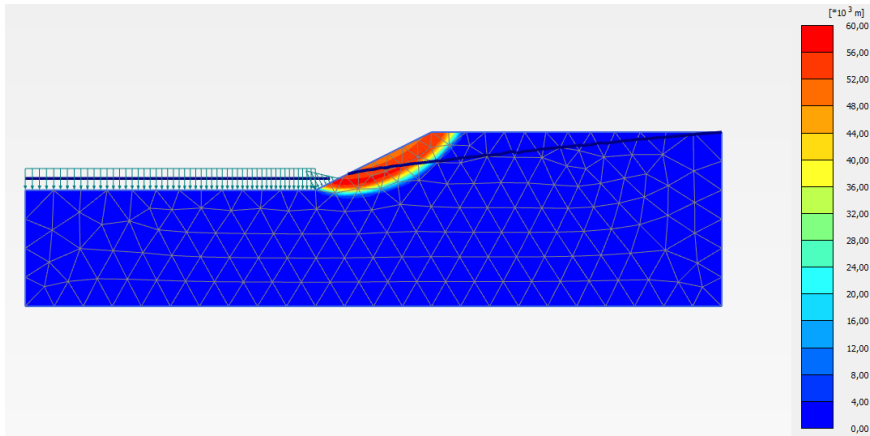


Figura 124 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

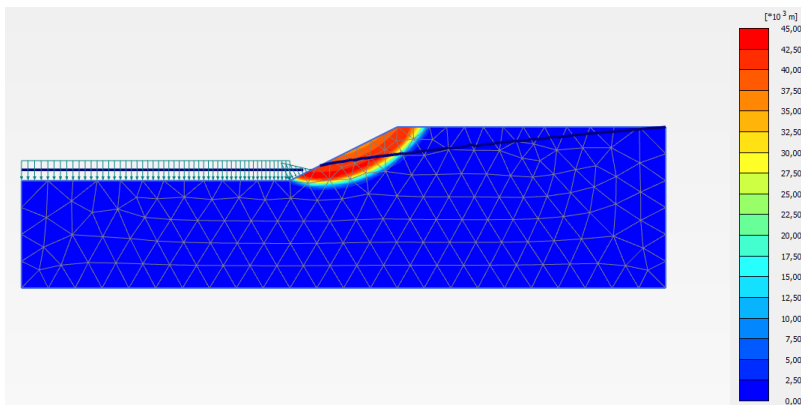
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

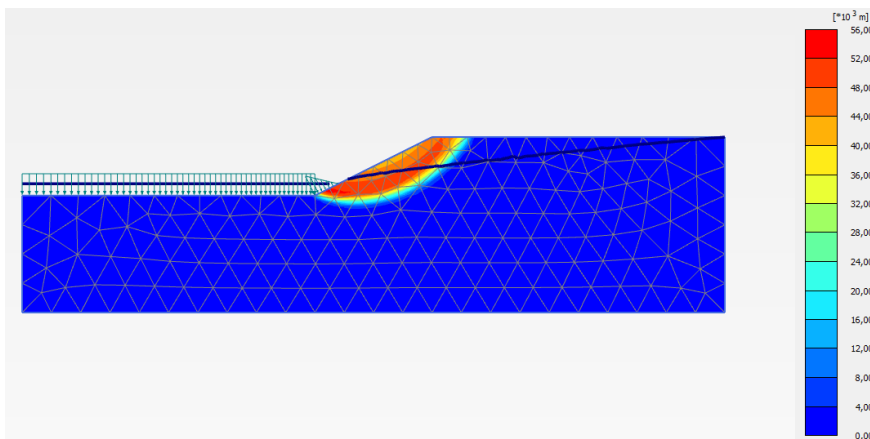
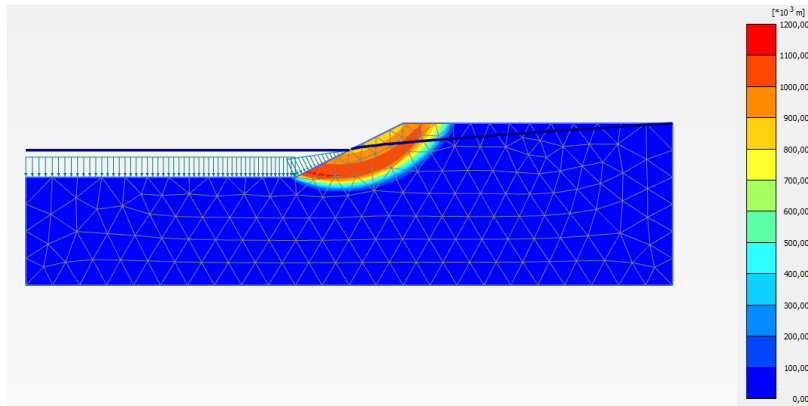


Figura 125 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

➤ Hw=5 metres

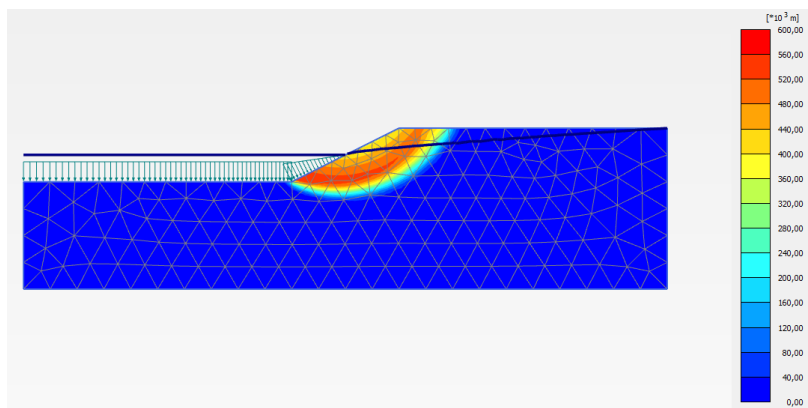
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

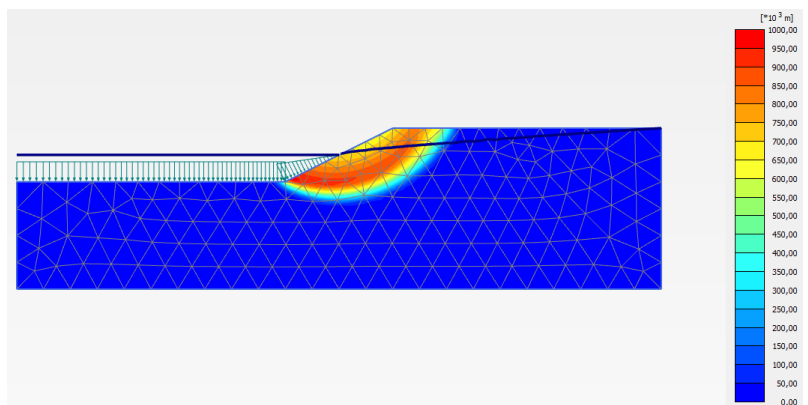
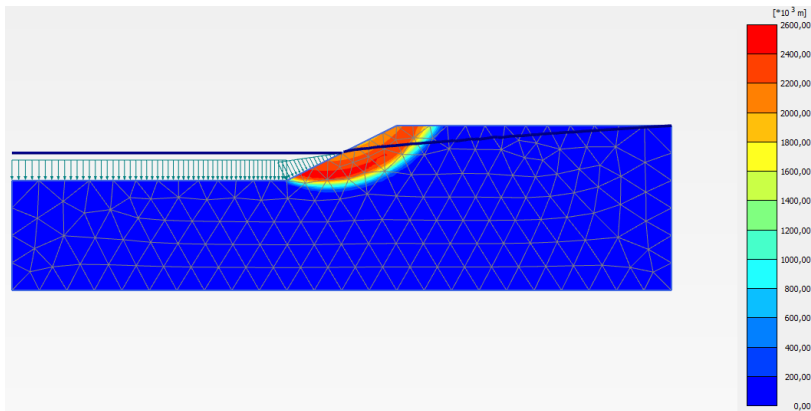


Figura 126 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

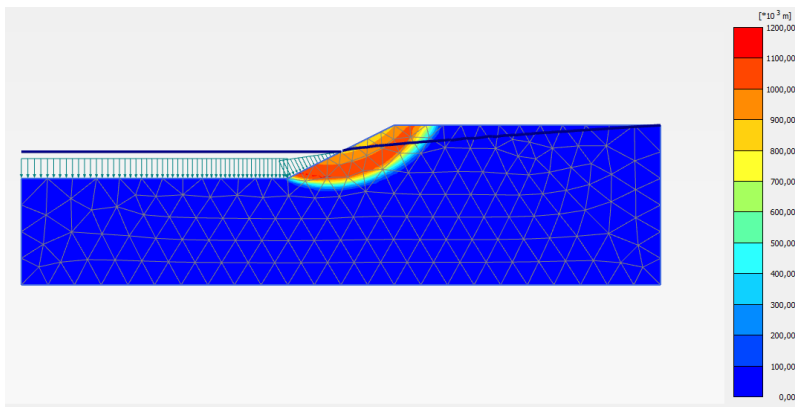
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

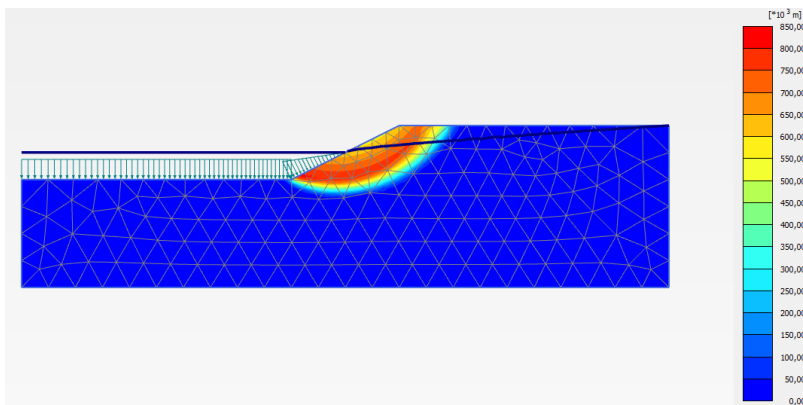
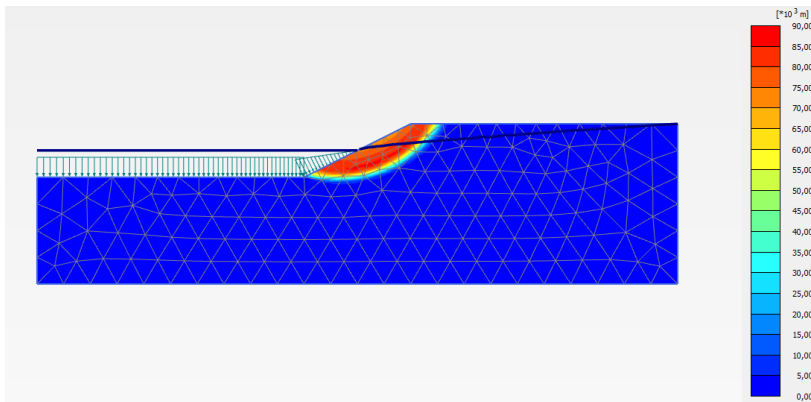


Figura 127 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

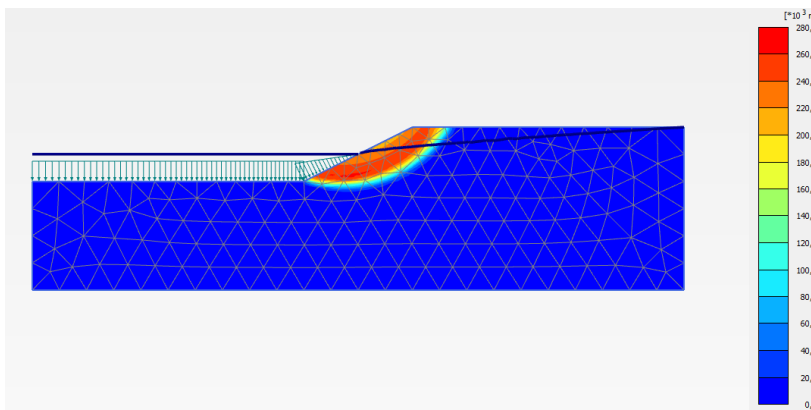
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

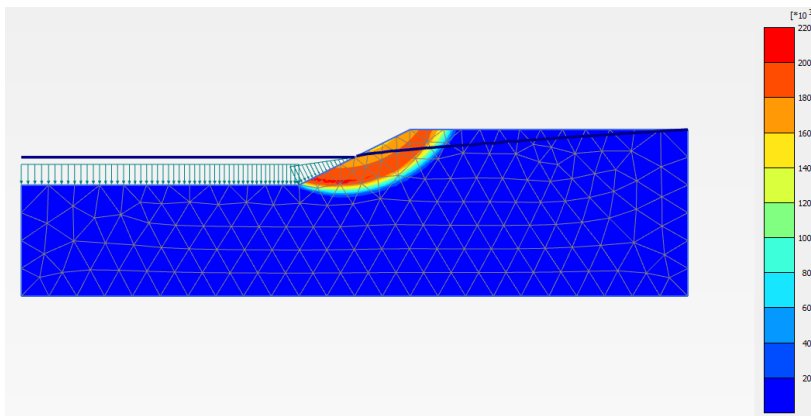
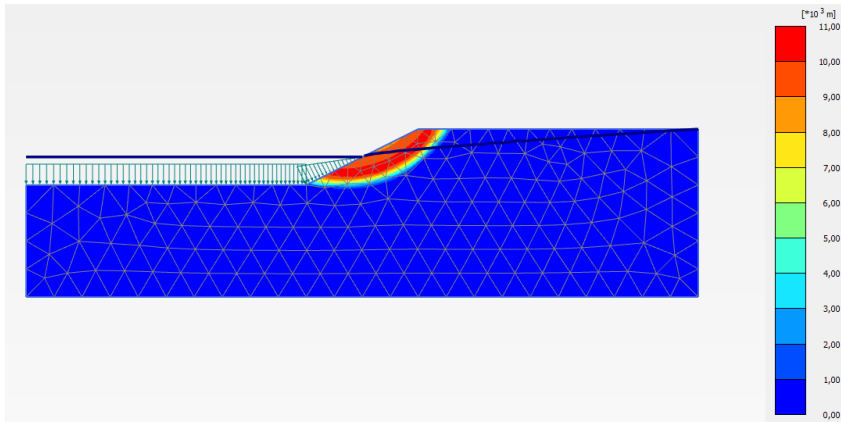


Figura 128 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

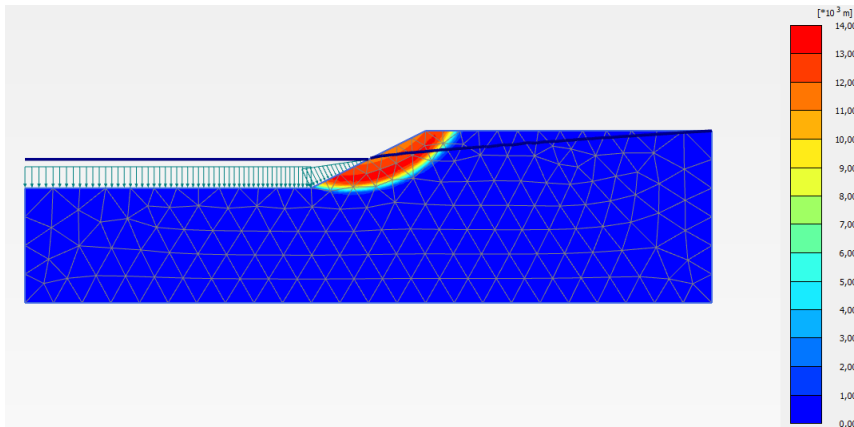
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

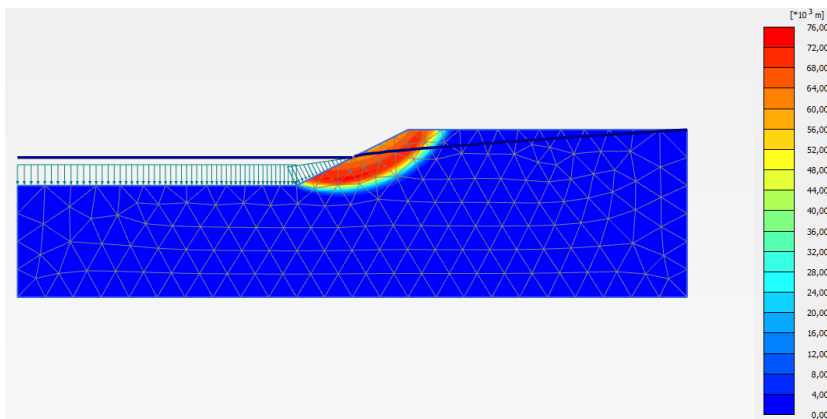
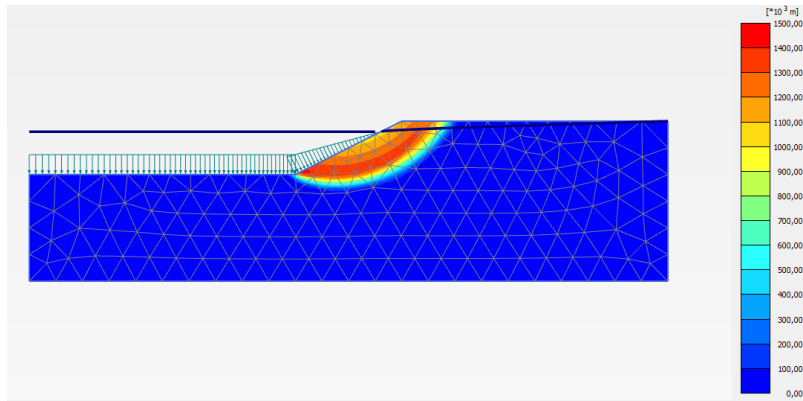


Figura 129 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

➤ Hw=8 metres

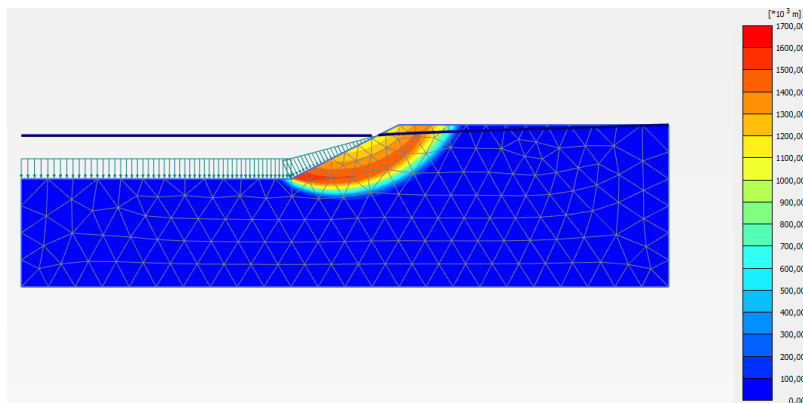
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

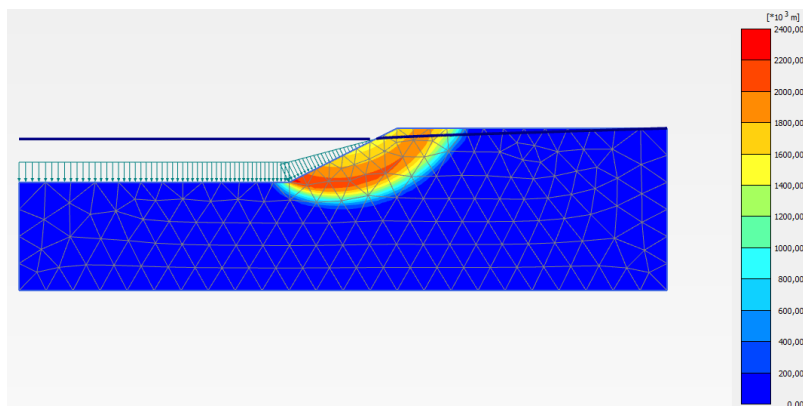
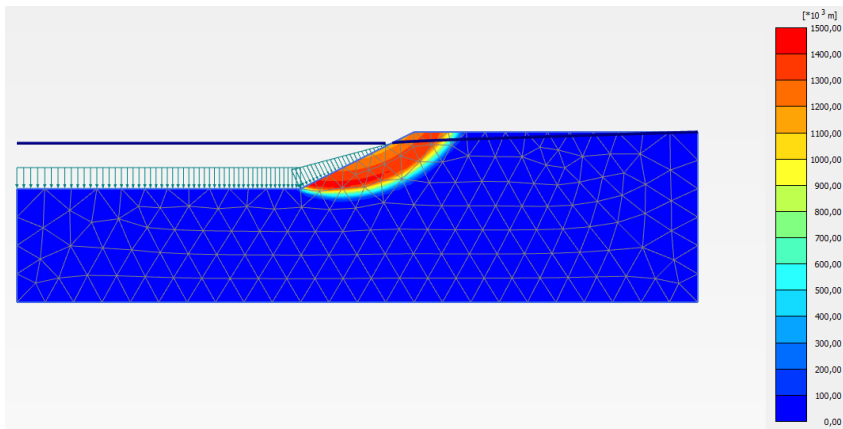


Figura 130 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

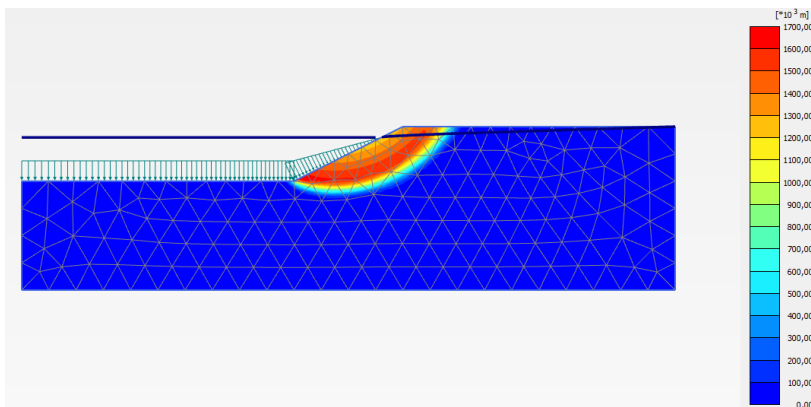
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

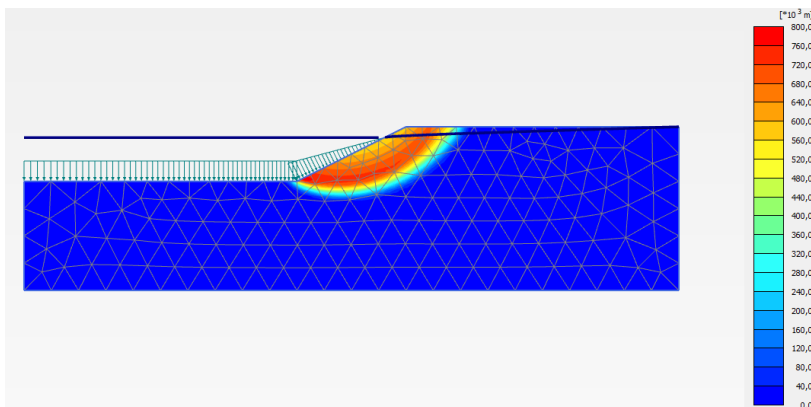
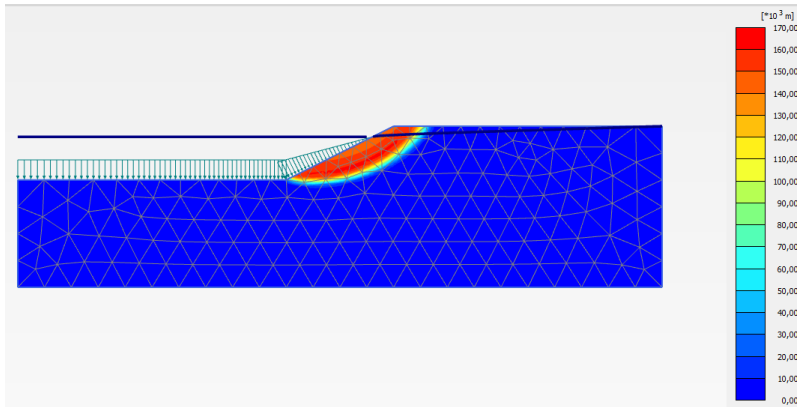


Figura 131 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

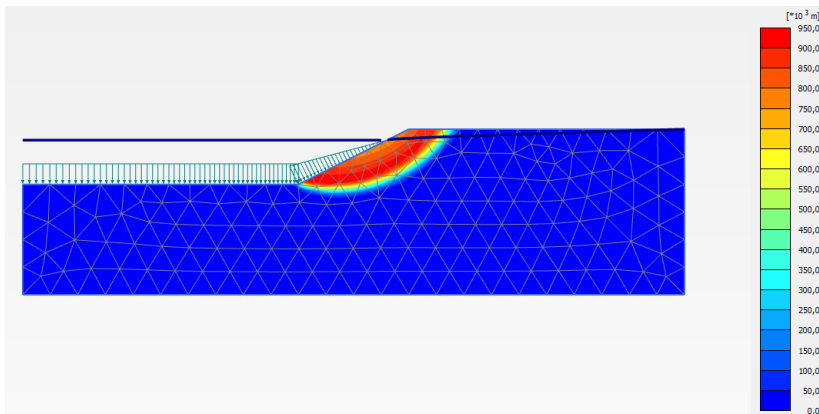
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

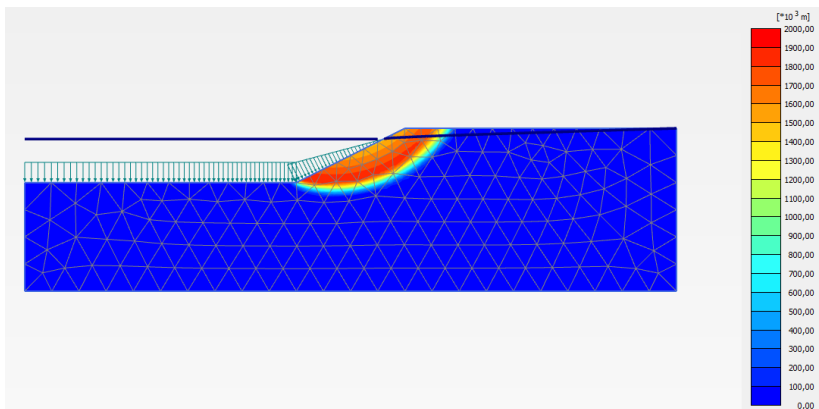
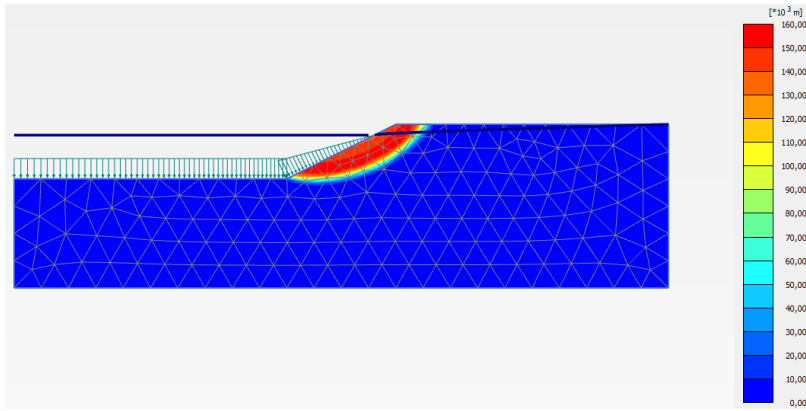


Figura 132 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

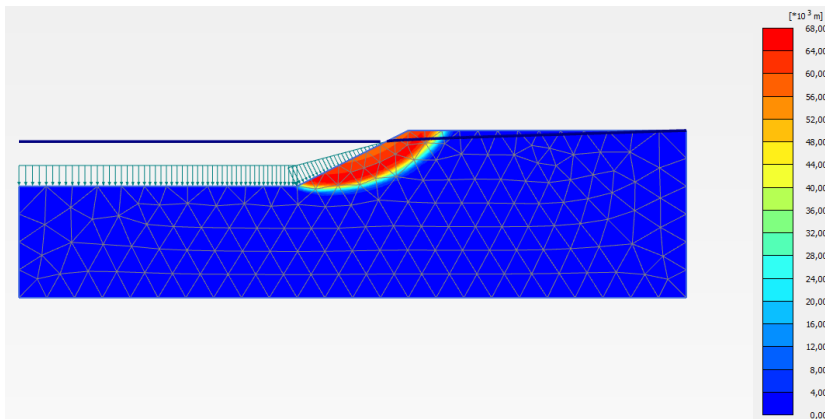
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

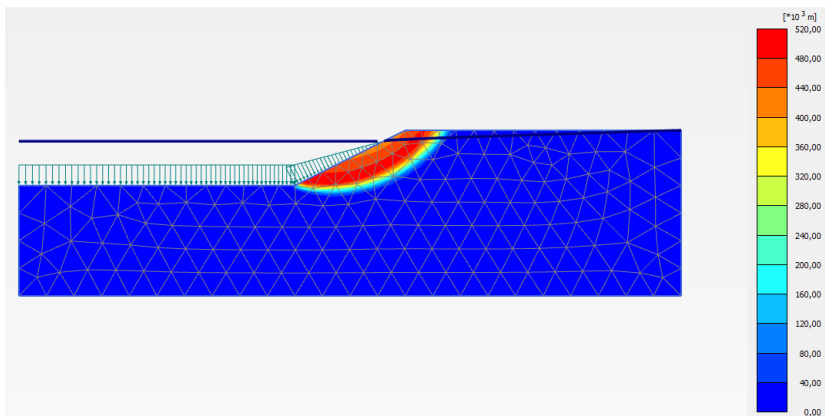
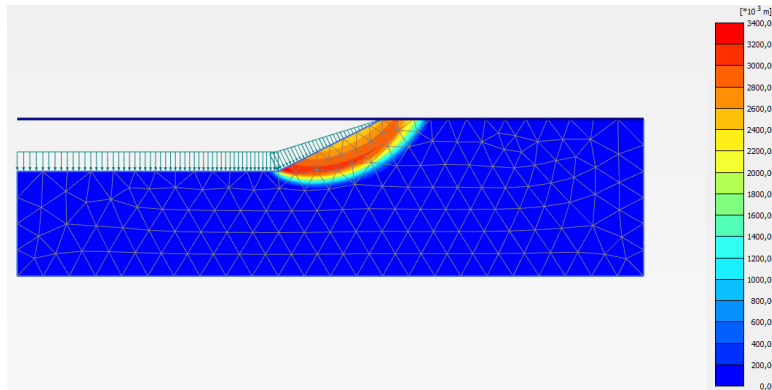


Figura 133 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

➤ Hw=10 metres

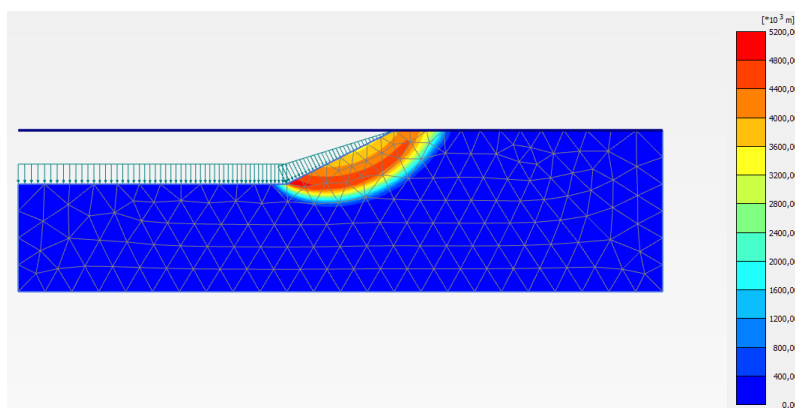
- $\varphi = 12^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

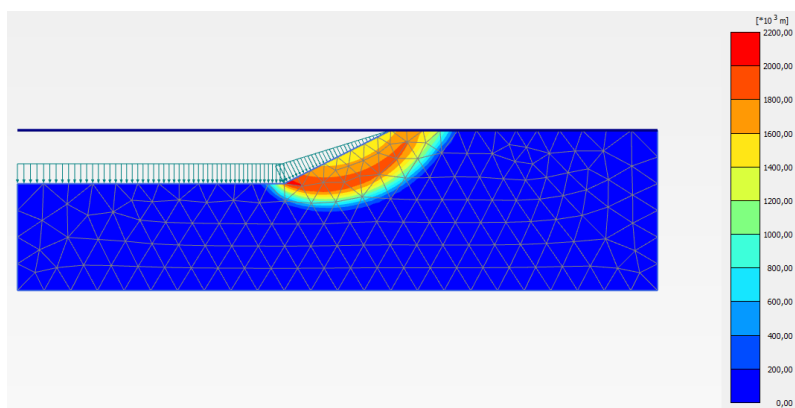
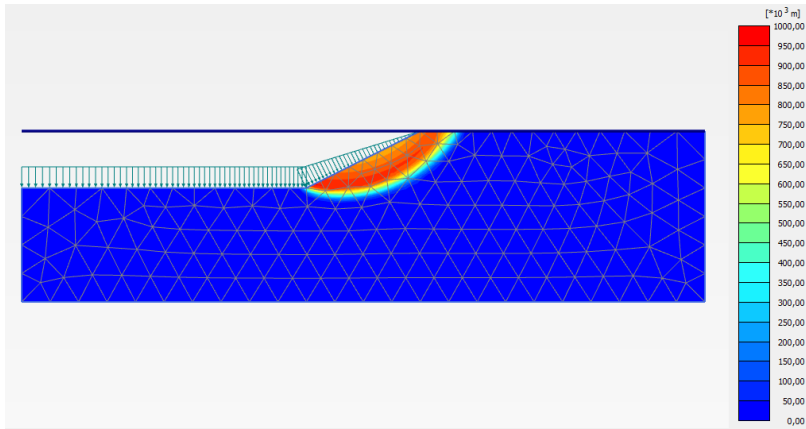


Figura 134 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=12^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

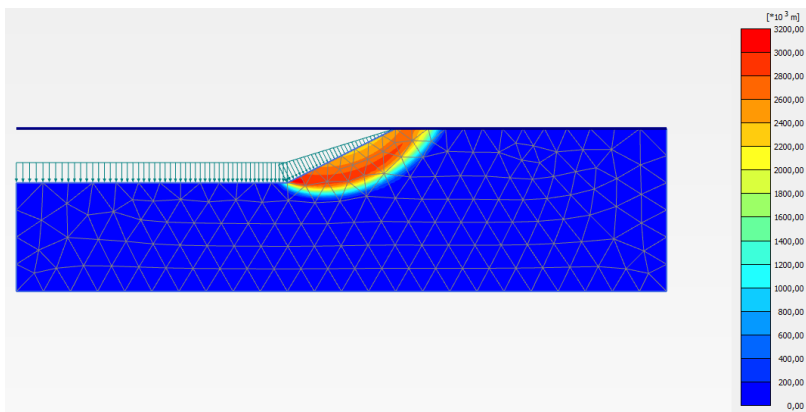
- $\varphi = 20^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

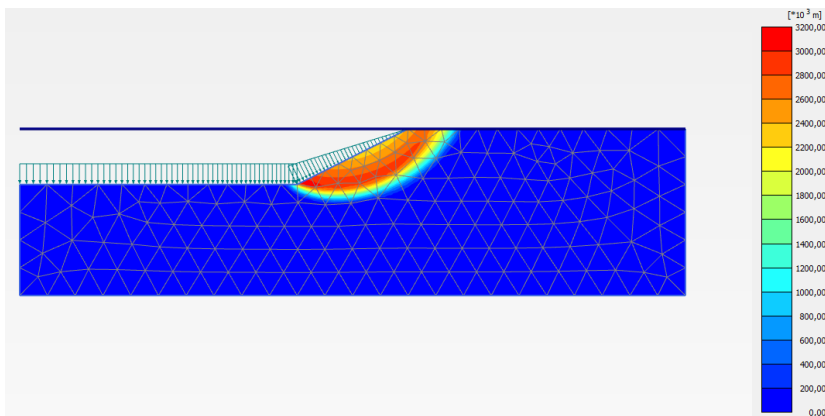
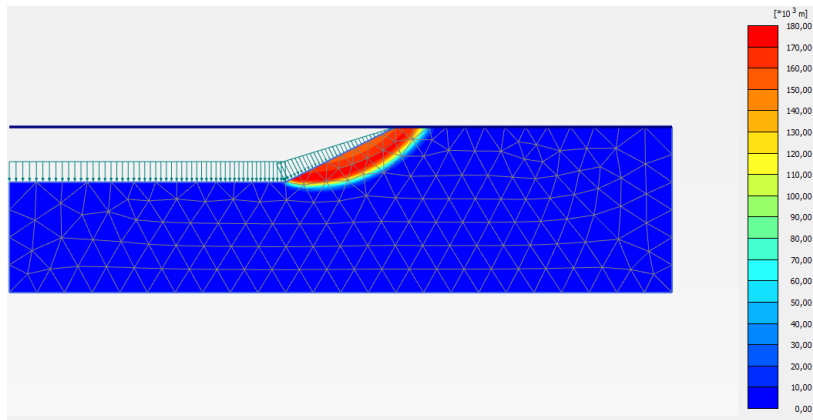


Figura 135 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=20^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

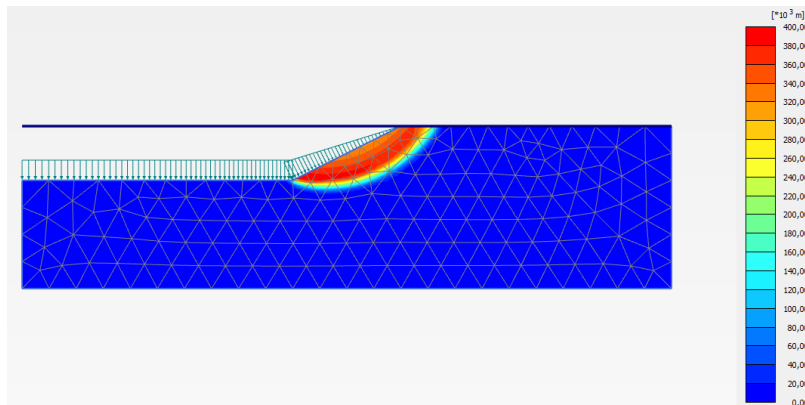
- $\varphi = 30^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

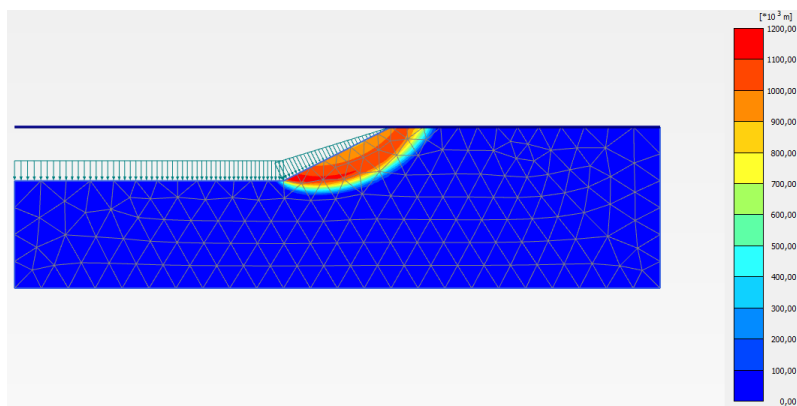
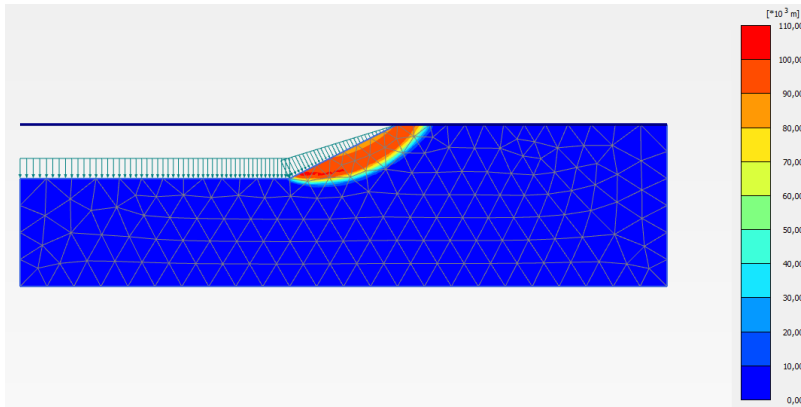


Figura 136 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=30^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

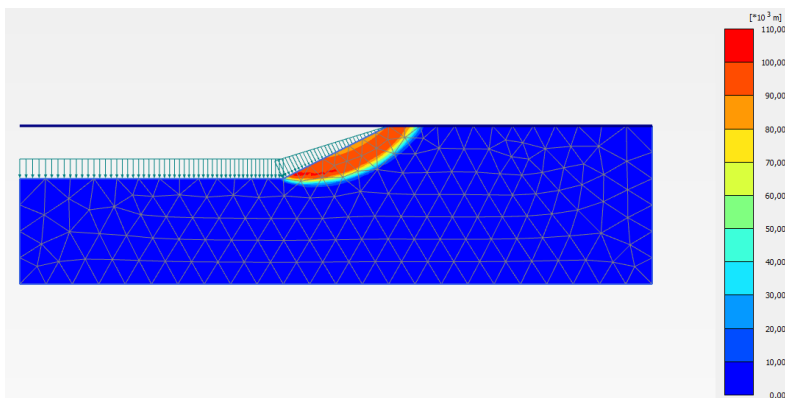
- $\varphi = 40^\circ$
 - $c = 18 \text{ kPa}$

(a)



- $c = 27 \text{ kPa}$

(b)



- $c = 36 \text{ kPa}$

(c)

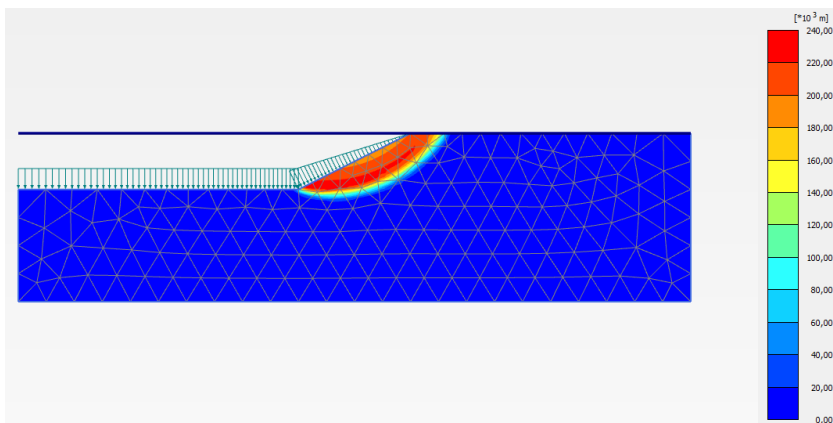
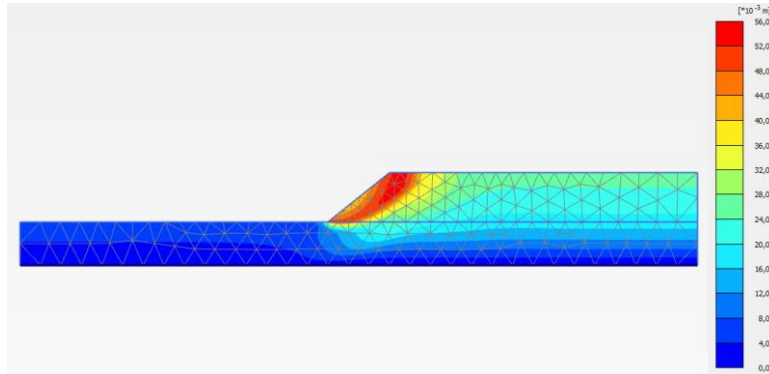


Figura 137 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $\varphi=40^\circ$. (a) $C2=18 \text{ kPa}$, (b) $C2=27 \text{ kPa}$ i (c) $C2=36 \text{ kPa}$

2. CAS 2: Sòls argilosos secs

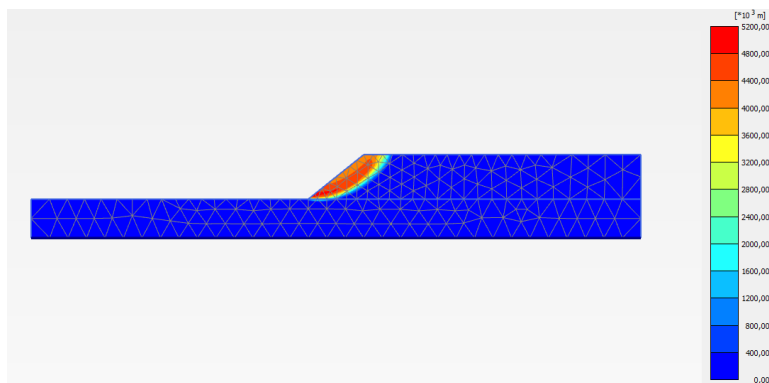
- $c_1 = 13,5 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 6,75 \text{ kPa}$]

(a)



- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 13,5 \text{ kPa}$]

(b)



- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 20,25 \text{ kPa}$]

(c)

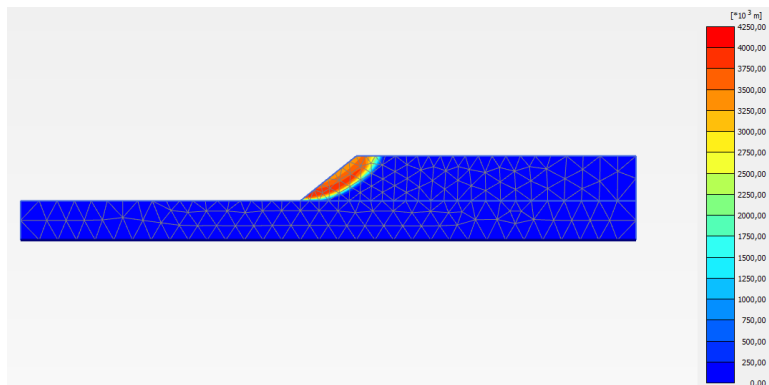
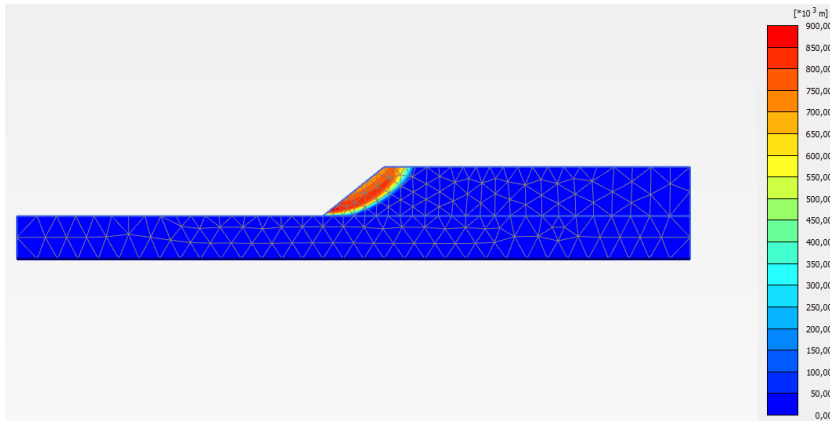


Figura 138 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $C_1=13,5\text{kPa}$. (a) $C_2=6,75\text{kPa}$, (b) $C_2=13,5\text{kPa}$ i (c) $C_2=20,25\text{kPa}$

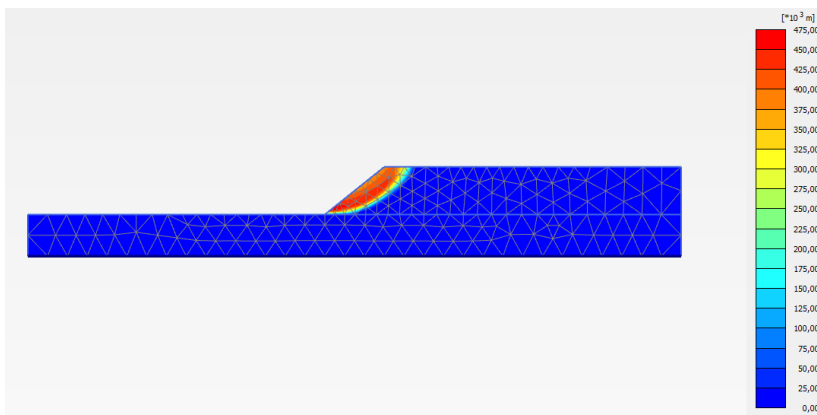
- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 27 \text{ kPa}$]

(a)



- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 33,75 \text{ kPa}$]

(b)



- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 40,5 \text{ kPa}$]

(c)

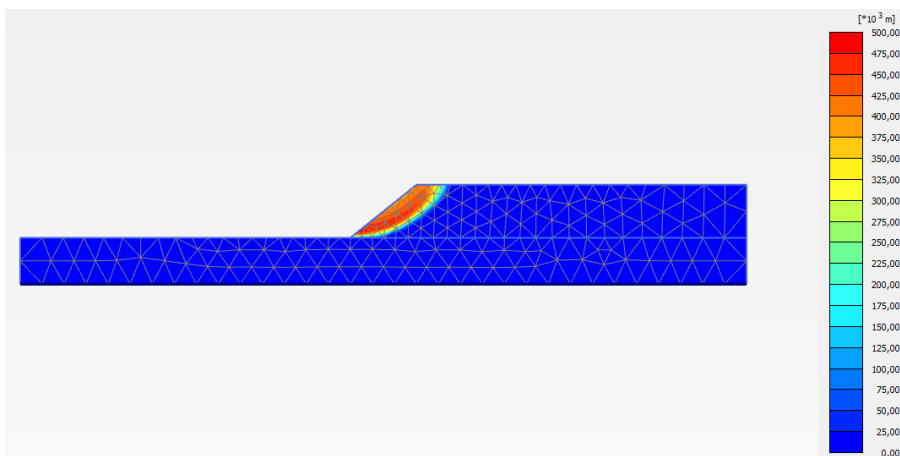
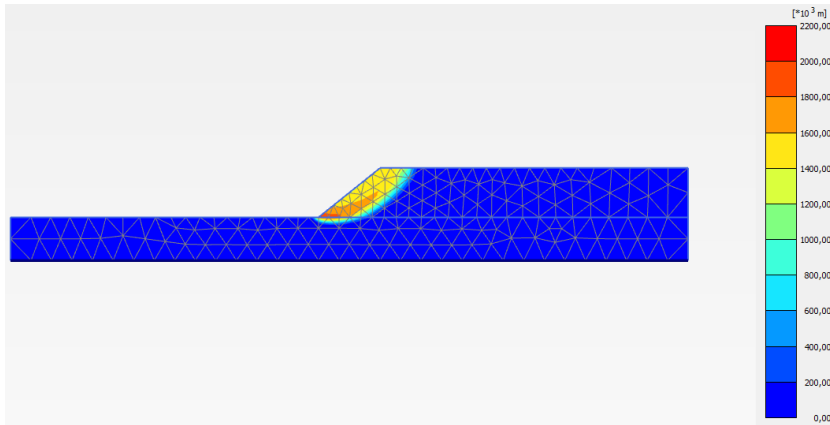


Figura 139 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $C_1=13,5\text{kPa}$. (a) $C_2=27\text{kPa}$, (b) $C_2=33,75\text{kPa}$ i (c) $=40,5\text{kPa}$

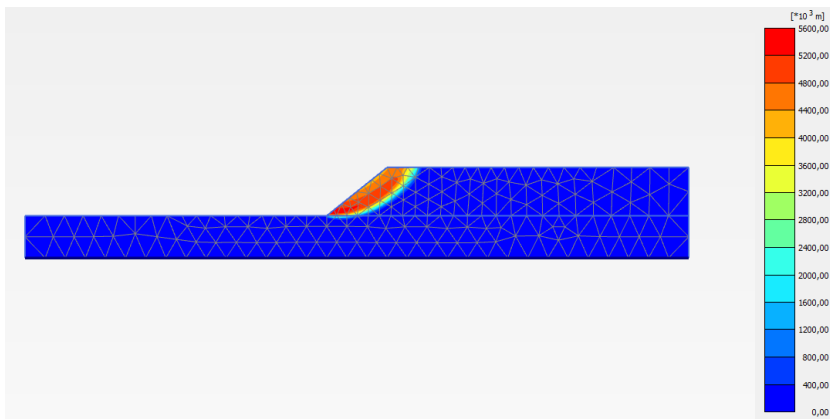
- $c_1 = 18 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 9 \text{ kPa}$]

(a)



- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 18 \text{ kPa}$]

(b)



- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 27 \text{ kPa}$]

(c)

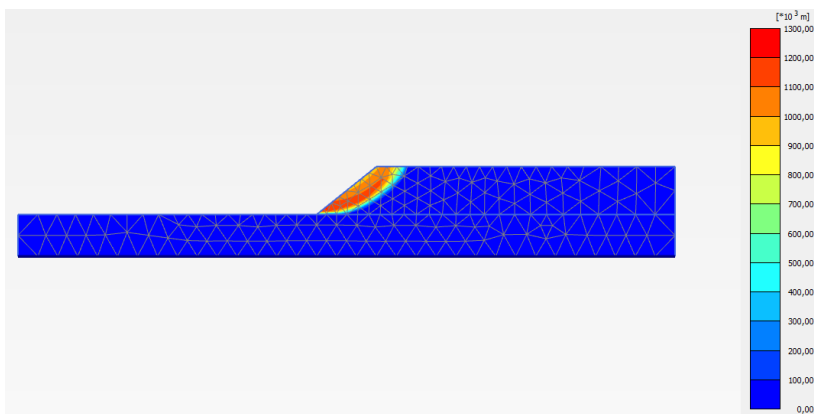
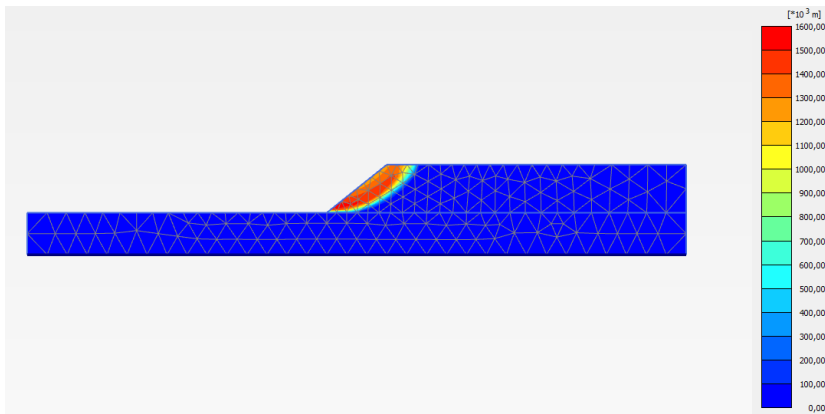


Figura 140 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $C_1=18\text{kPa}$. (a) $C_2=9 \text{ kPa}$, (b) $C_2=18 \text{ kPa}$ i (c) $=27\text{kPa}$

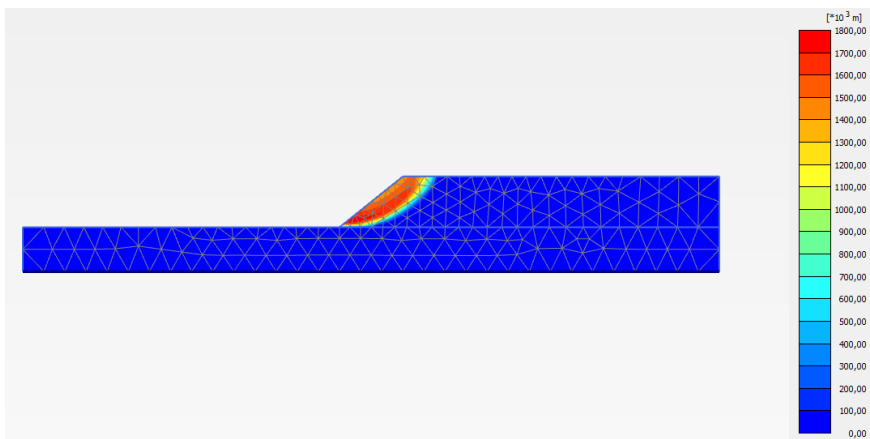
- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 36 \text{ kPa}$]

(a)



- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 45 \text{ kPa}$]

(b)



- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 54 \text{ kPa}$]

(c)

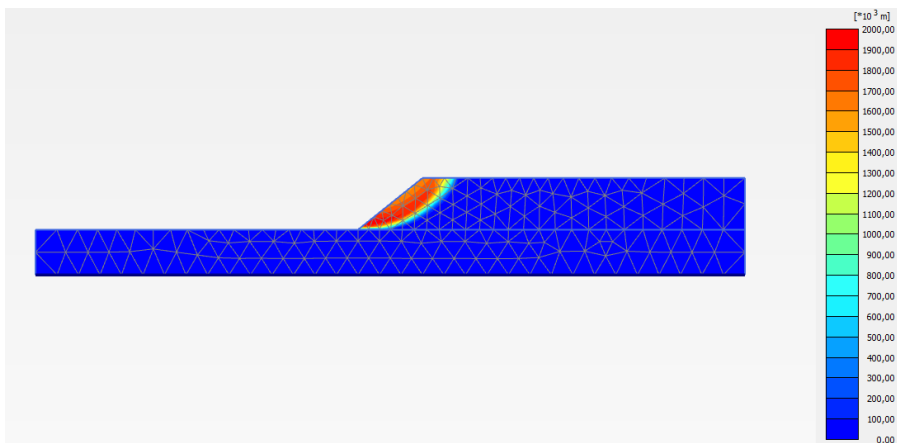
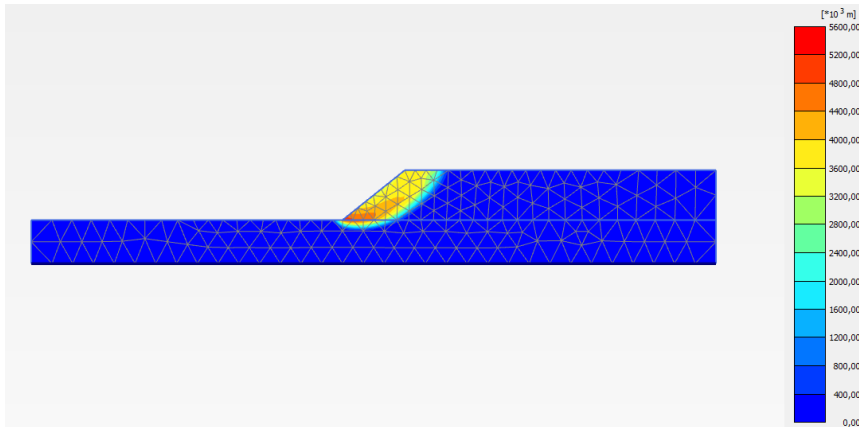


Figura 141 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $C_1=18\text{kPa}$. (a) $C_2=36\text{kPa}$, (b) $C_2=45\text{kPa}$ i (c) $=54\text{kPa}$

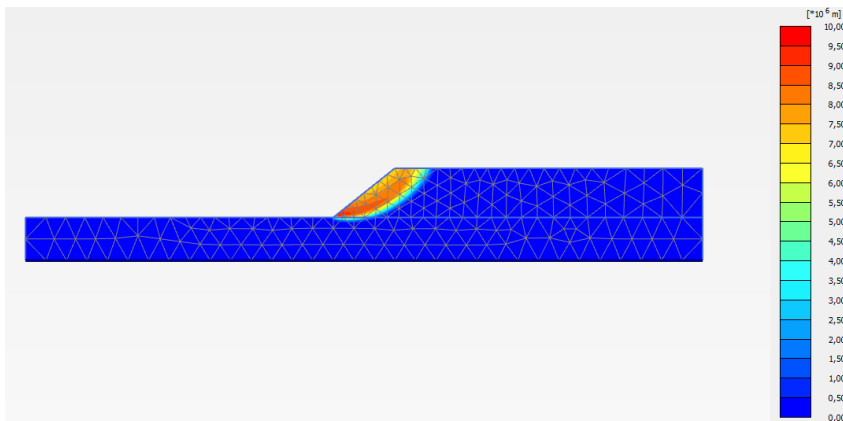
- $c_1 = 22,5 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 11,25 \text{ kPa}$]

(a)



- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 22,5 \text{ kPa}$]

(b)



- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 33,75 \text{ kPa}$]

(c)

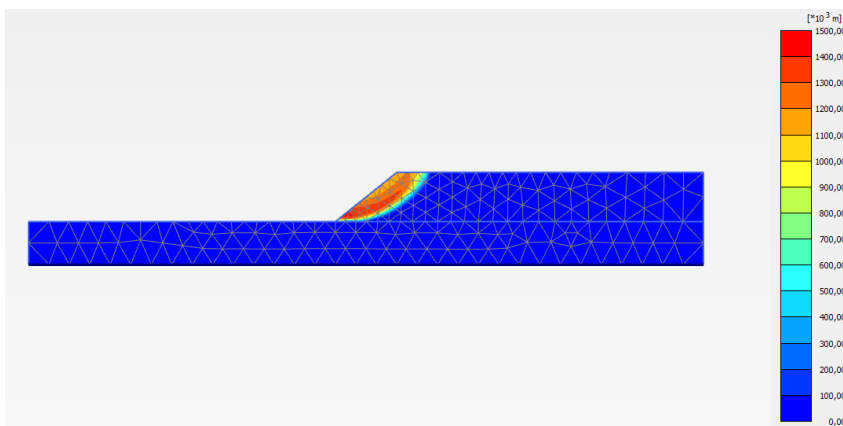
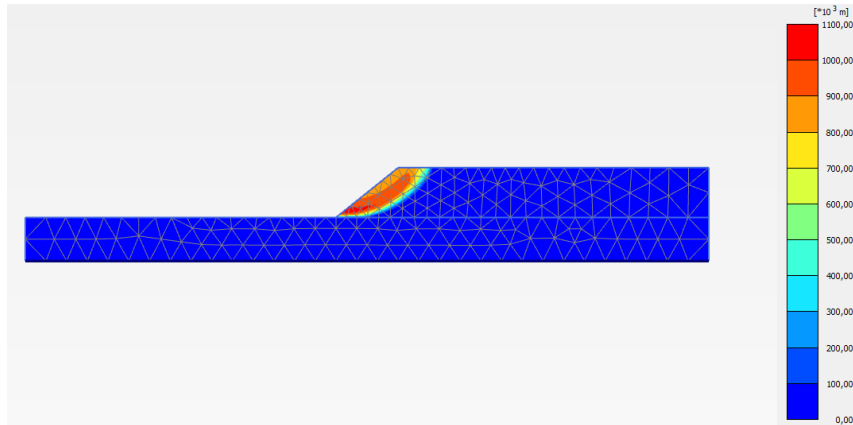


Figura 142 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $C_1=22,5\text{kPa}$. (a) $C_2=11,25\text{kPa}$, (b) $C_2=22,5\text{kPa}$ i (c) $=33,75\text{kPa}$

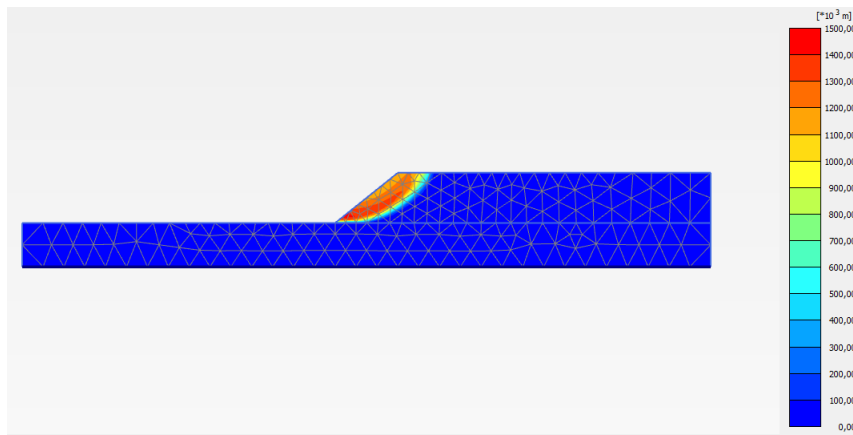
- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 45kPa$]

(a)



- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 56,25 kPa$]

(b)



- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 67,5 kPa$]

(c)

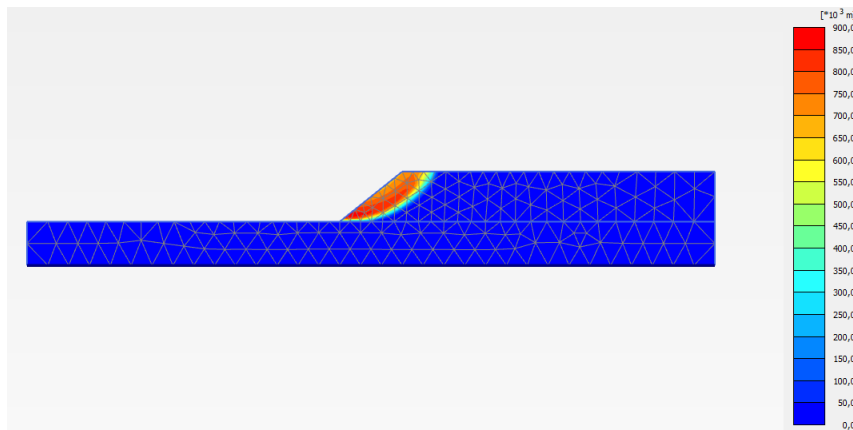
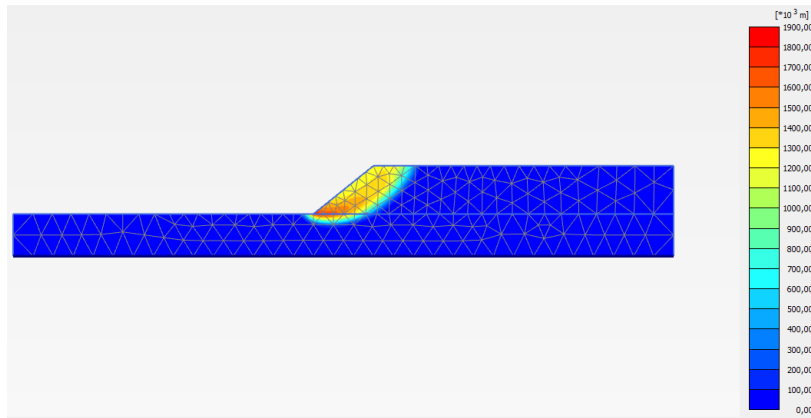


Figura 143 Desplaçaments totals. Prog.PLAXIS. $C_1=22,5kPa$. (a) $C_2=45kPa$, (b) $C_2=56,25kPa$ i (c) $=67,5kPa$

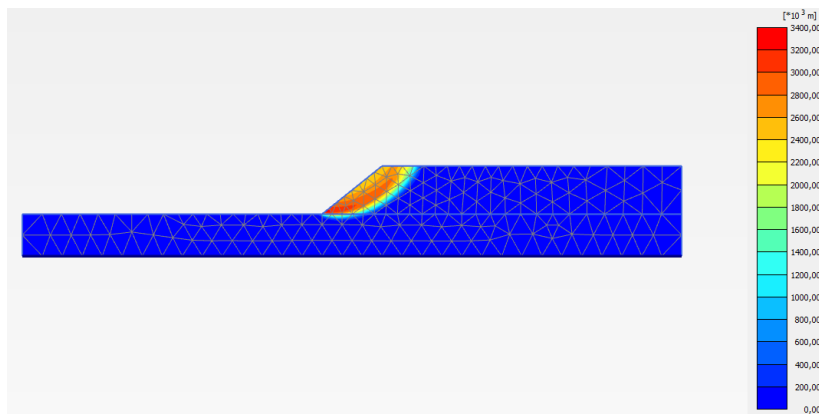
- $c_1 = 27 \text{ kPa}$
 - $c_2/c_1 = 0,5$ [$c_2 = 13,5 \text{ kPa}$]

(a)



- $c_2/c_1 = 1$ [$c_2 = 27 \text{ kPa}$]

(b)



- $c_2/c_1 = 1,5$ [$c_2 = 40,5 \text{ kPa}$]

(c)

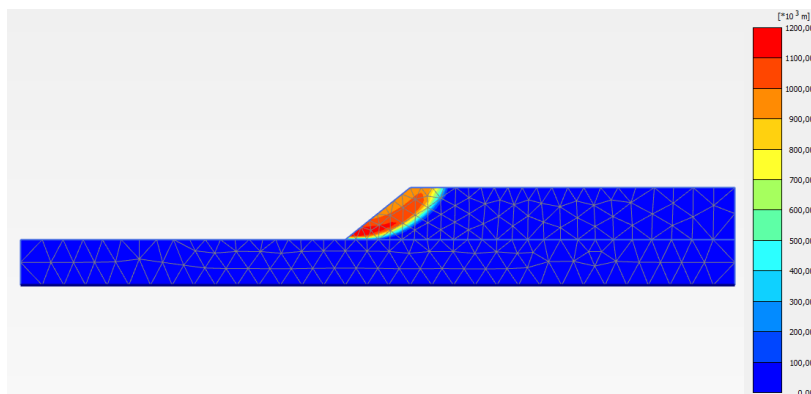
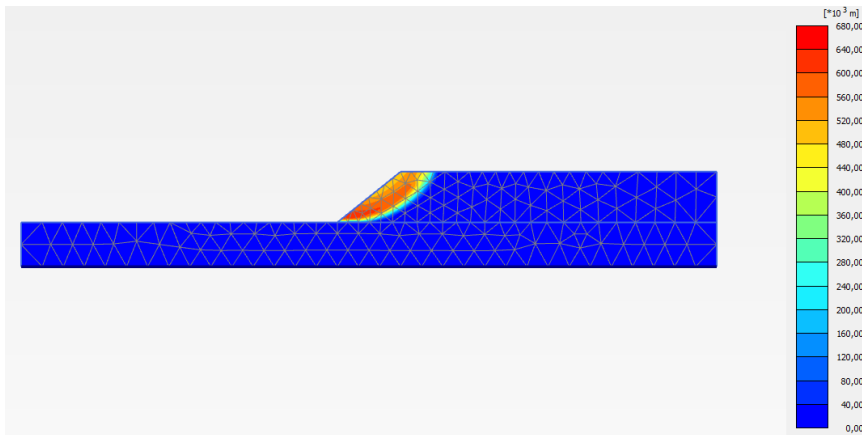


Figura 144 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $C_1=27\text{kPa}$. (a) $C_2=13,5\text{kPa}$, (b) $C_2=27\text{kPa}$ i (c) $=40,5\text{kPa}$

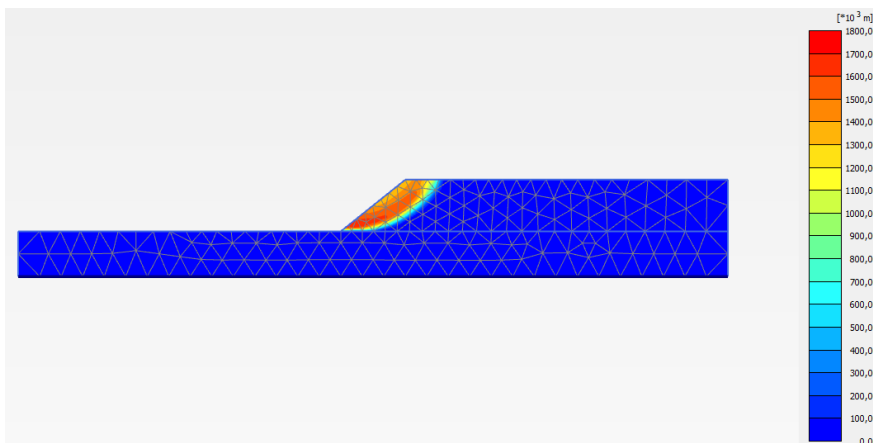
- $c_2/c_1 = 2$ [$c_2 = 54kPa$]

(a)



- $c_2/c_1 = 2,5$ [$c_2 = 67,5kPa$]

(b)



- $c_2/c_1 = 3$ [$c_2 = 81kPa$]

(c)

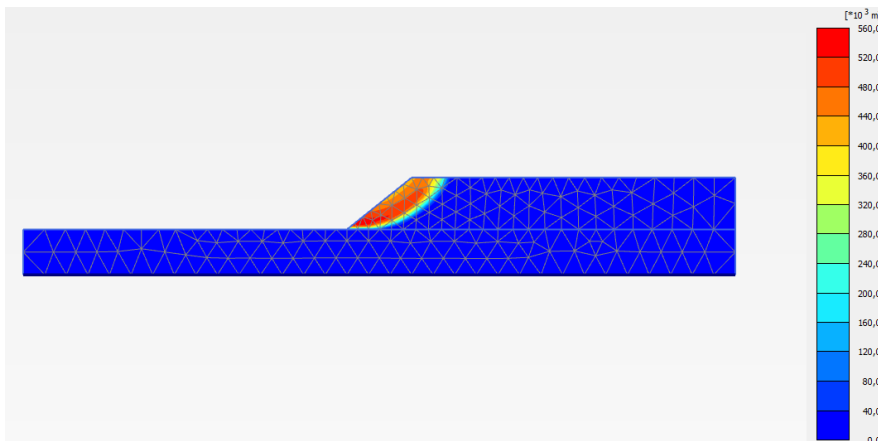
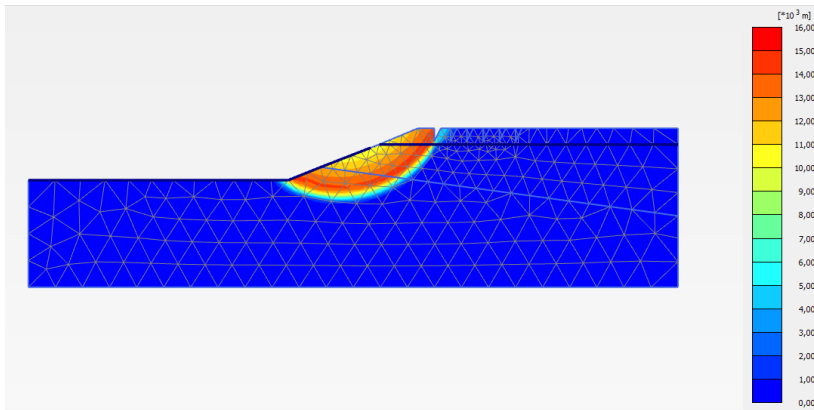


Figura 145 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. $C1=27kPa$. (a) $C2=54 kPa$, (b) $C2=67,5kPa$ i (c) $=81kPa$

3. CAS 3: Esquerdas a la part superior del talús

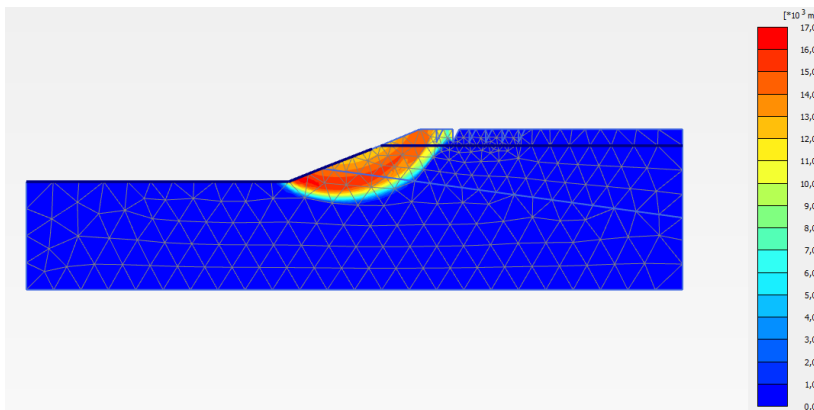
➤ $s = 5m$

(a)



➤ $s = 10m$

(b)



➤ $s = 15m$

(c)

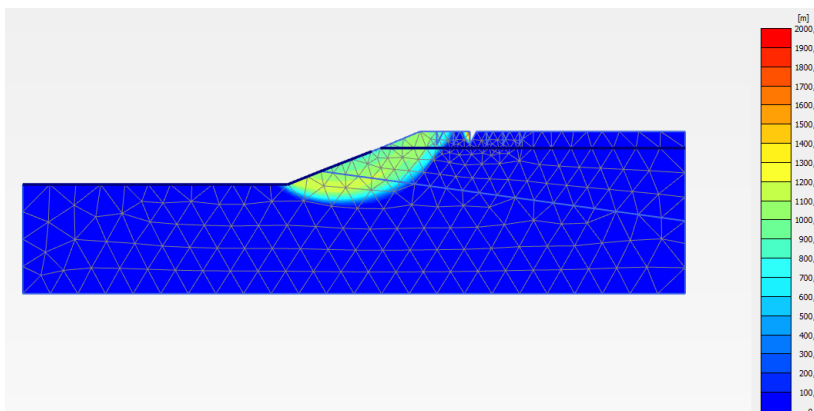
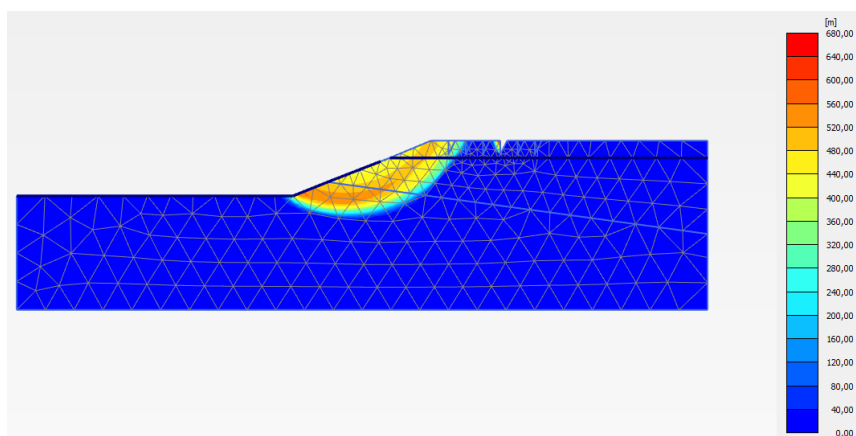


Figura 146 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. (a) $s=5m$, (b) $s=10m$ i (c) $s=15m$

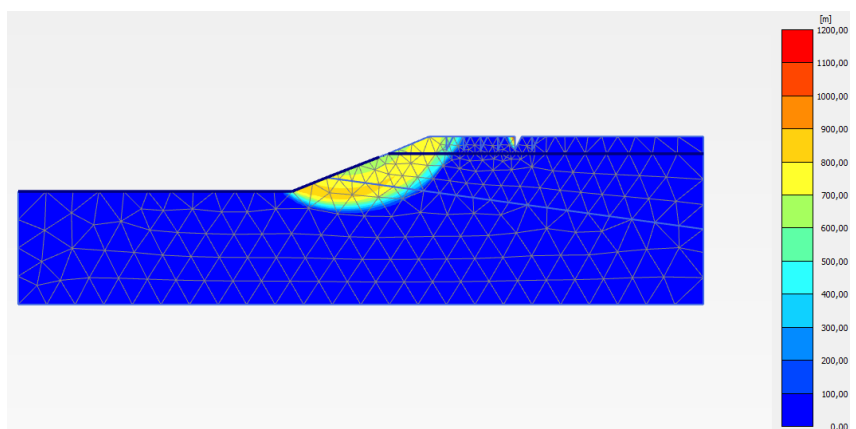
➤ $s = 20m$

(a)



➤ $s = 25m$

(b)



➤ $s = 30m$

(c)

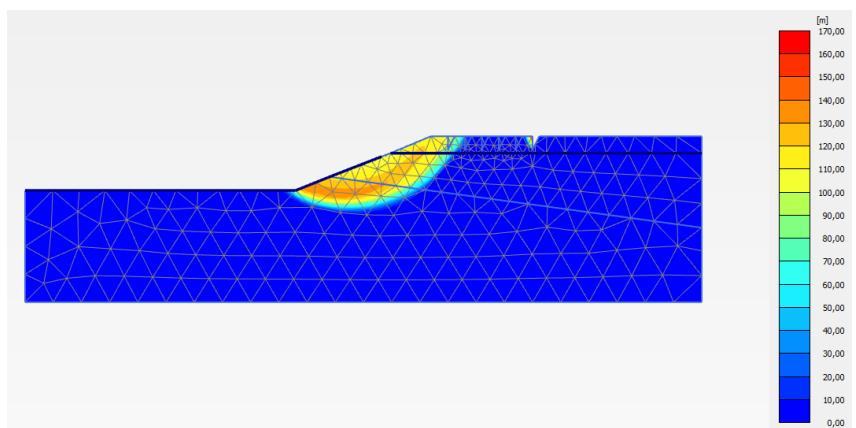


Figura 147 Desplaçaments totals. Prog. PLAXIS. (a) $s=20m$, (b) $s=25m$ i (c) $s=30m$